

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA SKLÁŘSKÝCH STROJŮ A ROBOTIKY

Pokročilé metody získání, interpretace obrazových dat a jejich aplikace v průmyslové praxi

ADVANCED METHODS FOR ACQUISITION, INTERPRETATION OF IMAGE
DATA AND THEIR APPLICATION IN INDUSTRY

HABILITAČNÍ PRÁCE

Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.

Počet výtisků: 6

Číslo výtisku:

Počet stran: 323

Počet příloh: 5

Vydáno: v Liberci 2. 5. 2019

Poděkování

Tato habilitační práce se stala nakonec mnohaletou prací, proto hlavní dík patří mé rodině, především mé manželce Liance, která mi vytvořila prostor pro sepsání nejen této publikace při současné výchově třech malých dětí.

Při přípravě materiálů k této práci a při jejím zpracování se mi dostalo účinné pomoci z mnoha stran. Byli to kolegové z katedry a fakulty, akademičtí pracovníci z dalších univerzit a lidé z průmyslové praxe. Vřelý dík pak patří panu doc. Ing. Františku Novotnému, CSc. za cenné rady, připomínky, důležité podněty a získání důležitých projektů, které umožnily realizovat zde uvedený výzkum a vedly k aplikacím v průmyslové praxi, doc. Ing. Vladimíru Klebsovi, CSc., který přispěl cennými připomínkami a korekturou textu, Ing. Ondřeji Matúškovi, který společně se mnou pracoval na většině zde uvedených aplikací, bratrovi Ing. Adamu Hotařovi, Ph.D. za spolupráci na jedné z částí této práce, doc. Ing. Elišce Chrpové, CSc. za zprostředkování a spolupráci na projektu NOVISCAM, který odstartoval vědeckovýzkumnou činnost v několika zde uvedených oblastech. Nelze opomenout kolegy z týmů, kteří na uvedených problematikách pracovali Ing. Marcel Horák, Ph.D., Ing. Michal Starý, Ph.D., Ing. Marie Stará, Ph.D., Ing. David Krčmařík, Ph.D., Ing. Alena Horáková a doc. Ing. Maroš Tunák, Ph.D.

Anotace

Pokročilé metody získání, interpretace obrazových dat a jejich aplikace v průmyslové praxi

Habilitační práce se zabývá získáním a zpracováním obrazových dat, jejich interpretací, se zaměřením na strukturované povrchy, transparentní a lesklé materiály, dále aplikací navržených postupů a nástrojů v praxi s důrazem na uspořádání a konstrukci zařízení. Práce je připravena jako ucelená odborná publikace pro vydání ve formě monografie.

Práce se skládá ze tří částí. **V první části jsou uvedeny cíle a definice pojmů. Následně jsou zmíněny metody získání a interpretace obrazových dat.** Text se odkazuje na připravená skripta: Úvod do problematiky strojového vidění. Dále je uveden obecný přehled možností získání obrazových dat se snahou zobecnit základní principy. Také jsou uvedeny některé nástroje pro interpretaci získaných obrazových dat, především s cílem získání 3D informace o sledovaném objektu a objektivního popisu strukturovaných dat. Tato část nepřináší nové vědecké poznatky.

V druhé a třetí části jsou přiblíženy výstupy vědeckovýzkumné činnosti a aplikace znalostí a poznatků v praxi, formovaných a dlouhodobě řešených na Katedře sklářských strojů a robotiky. Výsledky vedou také ke konstrukčnímu řešení zařízení pro aplikaci v průmyslové praxi. **Druhá část je zaměřena vědeckovýzkumně a je podpořena odbornými články,** z nichž nejvýznamnější jsou uvedeny v příloze práce. Řešenou problematikou v této části je především objektivní kvantifikace povrchových struktur. Tedy například hodnocení míry pravidelnosti nebo neuspořádanosti daného povrchu objektu, složitosti jeho tvaru, povrchové struktury, charakteru vad a další. Užitými nástroji jsou nástroje statistiky, fraktální geometrie, spektrální analýza a další. K analýze bylo použito dat ve formě snímků z kamer a z elektronového mikroskopu, dále snímků metalografických výbrusů a dat z profiloměru. Největší potenciál se objevuje u analýzy rozhraní, které je definováno jako rozhraní dvou materiálů nebo rozhraní světla a stínu. V textu je tak popsáno využití analýzy pro hodnocení korozních změn při působení skloviny nebo atmosféry na povrchu vzorků slitin se změnou doby expozice a složení slitin. Další využití analýzy je možné v oblasti metodiky hodnocení vlnitosti plochého skla pomocí tzv. corrugation testu, která byla rozpracována až do on-line testování a návrhu pro nasazení in-line. V práci jsou uvedeny i možnosti aplikace fraktální geometrie spolu s dalšími nástroji hodnocení povrchových vlastností sledovaného objektu.

Třetí část je orientována především na praktické aplikace v průmyslu a mimo jiné na vliv poznatků na konstrukci zařízení. Hlavní řešenou problematikou byla detekce transparentních a lesklých materiálů, včetně řešení neméně důležitých technických problémů s nasazením metod především pro sklářský průmysl. Teoretický rozbor je následně doplněn o praktické příklady, které vedou k aplikacím a jsou přenositelné do průmyslové praxe. Příkladem je detekce vad ve skle, použití bodových konfokálních snímačů pro získání 3D modelu výrobku ze skla, detekce a manipulace s lesklým objektem (tzv. bin picking) a další. Závěry a samotné metody jsou obecně použitelné (nikoliv přímo přenositelné) v mnoha průmyslových odvětvích.

Klíčová slova: strojové vidění, zpracování obrazu, fraktální geometrie, kontrola, sklo.

Annotation

Advanced Methods for Acquisition, Interpretation of Image Data and Their Application in Industry

The presented habilitation thesis deals with acquisition, processing and interpretation of image data, with a strong focus on structured surfaces, transparent and glossy materials as well as application of proposed procedures and tools in industry with an emphasis on the arrangement and the design of devices. The thesis is prepared as a compact technical publication to be subsequently published as a monograph.

The work consists of three parts. **In the first part, the aims of the work and definitions of the terms used are introduced. Subsequently image data acquisition and interpretation methods are briefly presented.** The text refers to author's textbook called Introduction to Machine Vision. Subsequently a general overview of image data acquisition possibilities is summarized, attempting simultaneously to make a generalization of basic principles. Several tools for data interpretation are also presented aiming to acquire 3D data on the object observed and objective description of structured data. This part of the thesis does not bring new scientific discoveries.

The second and the third parts of the thesis outline research outputs and application of knowledge and findings in industry, as formed and being solved on a long-term basis at the Department of Glass Producing Machines and Robotics. The results obtained also lead to finding design solutions of devices for industrial use applications. **The second part is focused on research and development and is supported by the author's scientific articles**, the most significant ones being listed in the Appendix to the thesis. The main issue solved in this part is objective quantification of surface structures. This means evaluation of periodicity or that of irregularities of investigated object's surface, complexity of its shape, surface structure, character of the defects, etc. The tools used for the evaluation are the ones used in statistics, followed by fractal geometry, spectral analysis and others. The analysis was performed based on data obtained in the form of images from cameras and an electron microscope, as well as images of metallographic samples and data from a profilometer. The highest potential appears to be in the analysis of dividing curve, defined as a divide between two different materials or the one between shadow and light. The text describes the use of the analysis for evaluation of corrosion changes caused by the effect of melted glass or air with a change of the exposure time and the alloy composition. Another application of the analysis is possible in evaluation methodology of the assessment of waviness of flat glass by means of the corrugation test. This application was processed up to on-line testing and design for in-line application. The thesis also presents other possibilities of application of fractal geometry jointly with some other tools used to assess the surface properties of the object analysed.

The third part is oriented mostly to practical applications in industry and among others on the influence of knowledge on the machine design. The main area of problematics solved in this part was the problem concerning transparent and glossy materials detection, including the solution of technical problems of the same level of importance connected with application of the method mainly for the glass industry. The theoretical analyses are supplemented by practical examples leading to applications and are transferable into the industry. The examples of this transferability might be defect detection in a glass, the use of point confocal sensors for obtaining 3D models of a glass products, detection and manipulation with a glossy object (called bin picking), etc. Both the conclusions and the methods are generally applicable in (though not directly transferable into) many industrial fields.

Key words: machine vision, image processing, fractal geometry, inspection, glass.

Obsah

Seznam použitých symbolů	11
Seznam použitých zkratk	15
Úvod.....	17
1 Cíle práce	19
1.1 Motivace	19
1.2 Cíle práce u strukturovaných povrchů.....	21
1.3 Cíle práce u objektů z transparentních materiálů a materiálů s lesklým povrchem.....	21
1.4 Cíle práce v oblasti aplikací.....	22
1.5 Výchozí znalosti a zkušenosti.....	22
2 Definice pojmů	25
3 Současné možnosti získání obrazových dat	29
3.1 Elektromagnetické záření	30
3.1.1 Odraz záření	31
3.1.2 Absorpce a propustnost záření	32
3.1.3 Emise záření	33
3.1.4 Lom záření	33
3.1.5 Vliv energie záření na interakci s hmotou.....	34
3.1.6 Pojem expozice.....	35
3.1.7 Optické záření.....	35
3.1.7.1 Povrch objektů a jejich odraz	35
3.1.7.2 Problematika odrazu a lomu na optickém rozhraní vzduchu a skla	36
3.1.7.3 Snímače optického záření	38
3.1.7.4 Snímače viditelného záření	39
3.1.7.5 Konfokální chromatické snímače	51
3.1.7.6 Snímače pro UV spektrum.....	54
3.1.7.7 Snímače pro IR spektrum	56
3.1.7.8 Systémy pro získání a interpretaci obrazu pomocí optického záření ..	60
3.1.8 Rentgenové záření.....	61
3.1.9 Gama záření	64
3.1.10 Pásmo radiových vln	65
3.2 Záření částic	66
3.3 Atomární síly.....	68
3.4 Zvukové (mechanické) vlnění	69
3.5 Elektrická energie	72
3.6 Kontaktní (mechanické) metody	73
3.7 Magnetická rezonance	75
3.8 Charakteristika získaných obrazových dat	79
3.8.1 Digitální obraz	79
3.8.2 Šum v pořízeném obraze.....	80

4	Současné možnosti interpretace obrazových dat	83
4.1	Obecná problematika interpretace obrazových dat	84
4.2	Nástroje interpretace obrazových dat	87
4.2.1	Transformace jasové stupnice	87
4.2.2	Prahování	88
4.2.3	Získání křivek rozhraní	90
4.3	Fraktální geometrie jako nástroj interpretace obrazových dat	92
4.3.1	Výpočet odhadu obvodové dimenze	95
4.3.2	Výpočet odhadu mřížkové dimenze	97
4.4	Možnosti interpretace obrazových dat pro získání 3D informace	98
4.4.1	Aktivní triangulace	100
4.4.1.1	1D triangulace	100
4.4.1.2	2D triangulace	102
4.4.1.3	3D triangulace	107
4.4.1.4	Použitelnost aktivní triangulace	110
4.4.2	Pasivní triangulace	111
4.4.2.1	Pasivní triangulace pomocí jednoho 2D snímače a jednoho snímku	111
4.4.2.2	Pasivní triangulace pomocí jednoho 2D snímače a více snímků v čase	111
4.4.2.3	Pasivní triangulace ze dvou a více 2D snímačů	111
4.4.2.4	Pasivní triangulace z jednoho 2D snímače ve více polohách	113
4.4.3	Kombinace pasivních a aktivních technik triangulace	113
4.4.4	Systémy s teodolitem	114
4.4.5	Podoba ze stínování	115
4.4.6	Fotometrické stereo	115
4.4.7	Tvar z obrysu	116
4.4.8	Fokusační techniky	116
4.4.9	Metody optické interferometrie	117
4.4.10	Měření doby letu modulovaného laserového paprsku	121
4.4.11	Možnosti interpretace mračna bodů	122
4.4.12	Tomografie	123
5	Problematika získání a interpretace obrazových dat u povrchové struktury	125
5.1	Hodnocení korozního napadení kovů a slitin	125
5.1.1	Princip metodiky	126
5.1.2	Příklad aplikace: odolnost slitin vůči roztavené sklovině	129
5.1.3	Příklad aplikace: odolnost slitin vůči atmosféře	137
5.1.3.1	Porovnání vlivu oxidace slitin A a B	138
5.1.3.2	Vliv teploty na oxidaci slitiny B	143
5.1.4	Porovnání metodiky s hodnocením struktury ve 2D	150
5.1.4.1	Vliv změny jasu na výsledky získané při použití mřížkové a obvodové dimenze	151
5.1.5	Závěr kapitoly	154
5.2	Corrugation test – kvantifikace jakosti plochého skla	154
5.2.1	Metodika kontroly jakosti pomocí corrugation testu	155
5.2.2	Princip metodiky objektivizace off-line hodnocení	156
5.2.3	Vývoj on-line hodnocení in-line	161
5.2.3.1	Testy se sérií odrazových ploch na lince	164

5.2.3.2	Vliv světelných podmínek, zdroje světla a stanovení míry zakrytí systému	166
5.2.3.3	Stanovení rozlišení snímače, podmínek a limit pro hodnocení technologické scény pod úhlem.....	166
5.2.4	Základní koncepce zařízení.....	177
5.2.5	Realizace experimentálního zařízení pro zkušební provoz on-line hodnocení corrugation testu.....	180
5.2.5.1	Flexibilní odrazová světelná deska	182
5.2.5.2	Stínítko pásu skla s rámem.....	184
5.2.5.3	Stativ kamery	184
5.2.5.4	Prvotní výsledky z experimentálního měření.....	185
5.2.6	Zkušební provoz on-line zařízení pro zavedení corrugation testu v provozních podmínkách	187
5.2.7	Vyhodnocení funkčnosti zkušebního zařízení pro zavedení on-line corrugation testu v provozních podmínkách	191
5.2.8	Návrh provozního zařízení pro on-line corrugation test in-line.....	192
5.2.9	Závěr kapitoly	197
5.3	Hodnocení povrchové 2D struktury	198
5.3.1	Princip metodiky	199
5.3.2	Příklad aplikace: hodnocení jakosti povrchu dírky skleněné perličky.....	199
5.3.3	Příklad aplikace: hodnocení mechanicky matovaného skla.....	205
5.3.4	Další testované aplikace	207
5.3.5	Závěr kapitoly	207
5.4	Kvantifikace dat z drsnoměru	209
6	Problematika získání a interpretace obrazových dat u objektů z transparentních materiálů a s lesklým povrchem	213
6.1	Potenciální principy získání obrazových dat u objektů ze skla.....	214
6.1.1	Detekce pomocí optického záření ve viditelném spektru.....	215
6.1.2	Detekce pomocí IR záření.....	217
6.1.3	Detekce pomocí UV záření	218
6.1.4	Detekce pomocí rentgenového brzdného záření.....	220
6.1.5	Detekce pomocí ultrazvuku.....	220
6.1.6	Další teoretické možnosti.....	221
6.2	Příklad aplikace: návrh detekce vad mačkárenských (polooptických) tyčí	222
6.2.1	Vznik bublinek ve skle	224
6.2.2	Výskyt kaménků ve skle	224
6.2.3	Detekce povrchových vad, bublinek a kaménků ve skle.....	225
6.2.4	Vznik šlír ve skle.....	232
6.2.5	Detekce šlír ve skle	234
6.2.5.1	Detekce šlír ve viditelném spektru	236
6.2.5.2	Lom světla na rozhraní šlíra–sklo	236
6.2.5.3	Zebra test a použití dalších vzorů.....	239
6.2.5.4	Detekce pomocí IR záření.....	244
6.2.5.5	Detekce pomocí UV záření	245
6.2.5.6	Detekce pomocí rentgenového brzdného záření.....	245
6.2.5.7	Detekce pomocí ultrazvuku.....	246
6.2.5.8	Detekce pomocí elektronového mikroskopu	247

6.2.5.9	Závěr kapitoly.....	247
6.3	Příklad aplikace: detekce vytékajícího proužku skloviny	247
6.4	Příklad aplikace: detekce „membránového napětí“ v automobilovém skle ...	248
6.5	Příklad aplikace: získání 3D obrazových dat pomocí konfokálních snímačů ...	252
6.5.1	Současné parametry a možnosti snímačů	252
6.5.2	Základní testy.....	253
6.5.3	Ověření deklarovaných předností konfokálních snímačů pomocí 3D souřadnicového měřicího stroje.....	255
6.5.4	Testování naklonění konfokálních snímačů, rušení směrovým světlem a další vlivy.....	257
6.5.5	Testování na robotizovaném pracovišti	259
6.5.5.1	Planparalelní destička	261
6.5.5.2	Klínová destička	267
6.5.5.3	Plankonvexní destička.....	269
6.5.6	Testování možností zpracování výstupních dat ze snímačů.....	271
6.5.7	Závěr kapitoly a potenciál využití konfokálních snímačů pro bezkontaktní detekci automobilových skel	273
6.6	Příklad aplikace: možnosti detekce bortů plaveného skla na výrobní lince	274
6.6.1	Detekce pomocí odrazu světelné zebra-desky od povrchu skla	275
6.6.2	Detekce pomocí konfokálních snímačů	276
6.6.3	Detekce pomocí projekce odraženého laserového paprsku	276
6.6.4	Porovnání výsledků.....	282
6.6.5	Možnosti automatizace uvažovaných přístupů	283
6.6.6	Závěr kapitoly.....	284
6.7	Detekce výrobků s lesklým povrchem	284
6.7.1	Příklad aplikace: bin picking s lesklými objekty	285
6.7.1.1	Popis vývoje chapadla pro bin picking.....	288
6.7.1.2	Snímače pro bin picking.....	290
6.7.1.3	Testované dodavatelské řešení detekce objektů	291
6.7.1.4	Vyvíjené alternativní řešení detekce objektů	292
6.7.1.5	Multi-senzorové řešení	294
6.7.1.6	Detekce objektu pomocí stereo vidění.....	297
6.7.1.7	Závěr kapitoly.....	298
7	Závěr	299
7.1	Přínosy pro vědu	302
7.2	Přínosy pro průmyslovou praxi	302
7.3	Přínosy pro pedagogickou činnost.....	303
	Literatura.....	305
	Projekty a granty, na kterých se autor významně podílel	319
	Seznam příloh.....	323

Seznam použitých symbolů

a_{mm}	analyzovaná délka skleněného pásu [mm]
a_{pixely}	analyzovaná délka skleněného pásu [pixely]
a_u	vzdálenost na snímku v pixelech v ose u [pixel]
a_x	pozice v analyzované délce skleněného pásu v ose x [mm]
A_i	plocha boxů potřebná pro pokrytí objektu [mm ² nebo pixel ²]
b	počet bytů (na pixel)
b_{data}	data z počítačového tomografu
b_f	faktor zvětšení
b_{mm}	analyzovaná šířka skleněného pásu [mm]
b_{pixely}	analyzovaná šířka skleněného pásu [pixely]
b_t	triangulační báze u triangulace [mm]
b_v	vzdálenost na snímku v pixelech v ose v [pixel]
$b_{v\ mm}$	vzdálenost projekce bodu na čipu v mm
b_z	pozice v analyzované šířce skleněného pásu v ose z [mm]
B	fotoelastická konstanta skla [MPa ⁻¹]
\mathbf{B}	binární obraz (matice)
B_0, B_1	intenzita vnějšího magnetického pole [T]
c	rychlost světla (299 792 458 m.s ⁻¹)
C	průměr otvoru clony [mm]
C_i	objem krychlí potřebný pro pokrytí objektu [mm ³ nebo pixel ³]
d	délka dráhy světla ve skle [cm]
d_{dis}	disparita (rozdíl dvou bodů v horizontální rovině $u_L - u_R$) [pixely]
d_z	výška sledované plochy [mm]
D	fraktální dimenze
D_C	obvodová dimenze
$D_{C\ 1000}$	obvodová dimenze, která je přepočtena na 1000 násobek
D_B	mřížková (box) dimenze
$D_{B\ 1000}$	mřížková (box) dimenze, která je přepočtena na 1000 násobek
D_{EEE}	poměr křivky extrémů
D_8	měření vzdálenosti pomocí osmi-sousedství (šachovnicová vzdálenost)
E	intenzita záření (jas) dopadající na světlocitlivou buňku (pixel) [W m ⁻²]
$E_i(\lambda)$	intenzita záření dopadající na plošku povrchu [W m ⁻²]
E_p	intenzita záření předmětové vlny [W m ⁻²]
$E_r(\lambda)$	intenzita záření vyzářená zpět do prostoru po odrazu [W m ⁻²]
E_R	intenzita záření referenční vlny [W m ⁻²]
E_{RE}	výstupní intenzita rentgenového záření [W m ⁻²]
E_{RE0}	vstupní intenzita rentgenového záření [W m ⁻²]
$E_t(\lambda)$	intenzita záření prošlá látkou [W m ⁻²]
f	ohnisková vzdálenost [mm]
f_b	obrazová (jasová) funkce

\mathbf{f}_b	matice obrazové (jasové) funkce
f_0	frekvence precesního pohybu (tzv. Larmorova frekvence), [MHz]
f_{rek}	rekonstruovaný obraz
Gx, Gy, Gz	gradientní magnetické pole v osách x , y a z
h	vypočtená pozice horizontu na snímku
h'	pozice horizontu na snímku získaná ze dvou hloubkových přímek
h_{pixel}	vzdálenost horizontu od okraje sledované oblasti pásu [mm]
H	hlavní bod jednobodové perspektivy
k	krok iterace
k_{1000}	konstanta o velikosti 1 000
k_j	počet úrovní jasu snímače obrazových dat
l_z	měřená vzdálenost bodu na povrchu objektu v ose z [mm]
l_Q	vzdálenost obrazové roviny od středu optiky [mm]
L	zdroj světla
L	zář (měrná zářivost) [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$]
L_{Ki}	délka křivky změřená vhodným měřítkem r_i [mm nebo pixel]
l_m	definovaná mřížková konstanta mřížky (techniky Moiré) [mm]
L_m	perioda vzniklá superpozicí dvou mřížek (techniky Moiré) [mm]
L_P	poměrná délka křivky [-]
l_{pixel}	délka křivky změřená vhodným měřítkem r_{pixel} [pixel]
$l_{pixel\ 1}$	délka křivky změřená měřítkem délky 1 pixel $r_{pixel\ 1} = 1$ [pixel]
l_{proj}	celková projekční délka [pixel]
L_R	relativní délka křivky [-]
L_{WD}	pracovní vzdálenost kamery [mm]
m_u	měřítka pro osu u a x
m_v	měřítka pro osu v a z
M_0	vektor magnetizace
M_z	vektor magnetizace v ose z
M_{xy}	vektor magnetizace v rovině xy
\mathbf{n}, \mathbf{n}	normála
n_c	parametr clony
n_e	parametr expozice
n_m	počet prvků v množině
N_c	číslo clony (clonové číslo) [mm]
$N_i(r)$	počet měřítek r potřebných k pokrytí množiny nebo křivky
n_i	index lomu okolního prostředí [-]
n_t	index lomu transparentního materiálu (např. skla) [-]
p	výchozí jasová stupnice
p_{mm}	velikosti pixelu [mm]
P	sledovaný bod v obraze
Pa	střední aritmetická úchylka profilu [μm nebo pixel]
Pt	maximální výška profilu [μm nebo pixel]
q	nová jasová stupnice
R	koeficient odrazivosti
Ra	střední aritmetická úchylka profilu pro drsnost [μm nebo pixel]
R_{ap}	aproximace diskrétní Radonovy transformace
R_{det}^2	koeficient determinace

R_F	funkce odrazivosti (odraz)
R_n	koeficient odrazivosti pro paprsek dopadající kolmo na rozhraní (ve směru normály)
R_{\perp}	koeficient odrazivosti pro polarizované záření v rovině kolmé na rovinu obrázku
R_{\parallel}	koeficient odrazivosti pro polarizované záření v rovině rovnoběžné s rovinou obrázku
r_i	použité měřítko k pokrytí (změření délky) křivky [mm nebo pixely]
$r_{BOX\ i}$	velikost hrany mřížky pro pokrytí objektu [mm nebo pixely]
r_{pixel}	použité měřítko k pokrytí (změření délky) křivky [pixely]
s	sklon regresní přímky
s_x	základna pro stereo vidění (definované posunutí kamery v horizontálním směru, v ose x) [mm]
S	plocha [mm ²]
ΔS_k	změna interferenčního řádu
Sm	střední rozteč nerovností profilu [μ m nebo pixely]
Std	směrodatná odchylka
t	doba letu paprsku elektromagnetického záření
t_1	spin-mřížková interakce (podélná relaxace – longitudinální)
t_2	spin-spinová interakce (příčná relaxace – transverzální)
t_h	zvolený práh (prahová hodnota)
t_m	tloušťka materiálu [m]
T	transformace jasové stupnice
T_p	koeficient propustnosti (propustnost, transmittance)
$T1$	relaxační konstanta uvádějící čas, za jaký dojde k obnovení velikosti magnetizace M_z na 63 % původní velikosti [s]
$T2$	relaxační konstanta uvádějící čas, za který dojde k poklesu velikosti magnetizace M_{xy} na 37 % maxima [ms]
T_E	čas expozice [s]
$u_{s\ pixel}$	délka snímáče v [pixel]
$u_{s\ mm}$	délka snímáče v [mm]
u	horizontální osa snímáče, osa u získaného obrazu nebo virtuálního modelu [měření v pixelech nebo voxelech]
u_L	pozice bodu na levém 2D snímáči [pixel]
u_R	pozice bodu na pravém 2D snímáči [pixel]
v	vertikální osa snímáče, osa v získaného obrazu nebo virtuálního modelu [měření v pixelech nebo voxelech]
v_L	pozice bodu na levém 2D snímáči [pixel]
v_R	pozice bodu na pravém 2D snímáči [pixel]
$v_{s\ pixel}$	šířka snímáče v [pixel]
$v_{s\ mm}$	šířka snímáče v [mm]
V	pozorovatel
w	osa w získaného obrazu nebo virtuálního modelu [měření ve voxelech]
w_{def}	délky zdeformované části skla [pixely]
w_i	váha detekovaného směru umístění objektu/struktury [-]
x	osa x skutečného prostoru [měření v mm]
$x_{d\ dolni}$	délka dolní hrany odrazové desky [mm]
$x_{d\ horni}$	délka horní hrany odrazové desky [mm]
x_i	vzdálenost v ose x skutečného prostoru [mm]
x_{snim}	snímaná délka pásu v ose x [mm]

y	osa y skutečného prostoru [měření v mm]
y_d	výška desky v ose y [mm]
$y_d\text{ dolni}$	vzdálenost dolní hrany odrazové desky od pásu skla [mm]
$y_d\text{ horni}$	vzdálenost horní hrany odrazové desky od pásu skla [mm]
$y_d\text{ proj}$	projekční výška desky v ose y [mm]
$y_d\text{ stred}$	vzdálenost středu odrazové desky od podlahy [mm]
y_i	vzdálenost v ose y skutečného prostoru [mm]
y_k	pozice kamery od okraje pásu skla v ose y [mm]
$y_d\text{ z dolni}$	výška zakreslení dolní hrany v ose y [mm]
$y_d\text{ z horni}$	výška zakreslení horní hrany v ose y [mm]
z	osa z skutečného prostoru [měření v mm]
$z_d\text{ dolni}$	vzdálenost dolní hrany odrazové desky v ose z [mm]
$z_d\text{ horni}$	vzdálenost horní hrany odrazové desky v ose z [mm]
z_i	vzdálenost v ose z skutečného prostoru [mm]
z_k	pozice kamery od okraje pásu skla v ose z [mm]
$z_{l\text{ pocatek}}$	vzdálenost mezi počátkem přířezu a laserovým paprskem [mm]
z_{okraj}	okraj pásu skla, který je od pásu oddělen (bort) v ose z [mm]
z_P	vzdálenost bodu P v ose z [mm]
z_{pas}	šíře pásu skla v ose z [mm]
$z_{prekriv}$	překryv záběru kamer na pásu skla v ose z [mm]
z_{rez}	vzdálenost pro detekci počátku deformace od okraje skla [mm]
z_{snim}	snímaná šíře pásu skla v ose z [mm]

α	záření alfa
α_d	úhel umístění kamery [°]
α_e	úhel otočení sledovaného objektu [°]
$\alpha_{e\ i}$	úhel hlavních směrů získaný z Fourierovy transformace [°]
α_m	úhel natočení mřížek při použití techniky Moiré [°]
α_n	zorný úhel n pixelu [°]
α_p	zorný úhel pixelu [°]
α_r	úhel nastavení rolny [°]
α_s	zorný úhel snímače [°]
α_t	úhel zdroje paprsku svíraný s triangulační bází [°]
α_3	zorný úhel sledované šířky pásu [°]
β	záření beta
β_d	naklonění odrazové desky [°]
β_t	úhel odraženého paprsku svíraný s triangulační bází [°]
γ	záření gama
γ_0	gyromagnetický poměr [$T^{-1}s^{-1}$]
$\gamma_{d\ i}$	úhel mezi sledovaným pásem skla a středem záběru kamery [°]
δ	vzdálenost roviny snímače od obrazové roviny
Δ	dráhový rozdíl řádného a mimořádného paprsku [nm]
ε	koeficient emisivity
θ_i	úhel dopadu (mezi normálou a dopadajícím paprskem) [°]
θ_r	úhel odrazu (mezi normálou a odraženým paprskem) [°]
θ_t	úhel lomu (mezi normálou a lomeným paprskem) [°]
θ_{im}	mezní úhel dopadu (mezi normálou a lomeným paprskem) [°]

θ_B	Brewsterův úhel [°]
λ	vlnová délka [nm]
μ_E	lineární součinitel zeslabení záření [cm^{-1}]
μ_{EW}	lineární součinitel zeslabení záření ve vodě, $0,22 \text{ cm}^{-1}$
σ	napětí [MPa]
ϕ	směr hrany
ψ	úhel mezi souřadnou osou u a rádiusem k bodu (u, v) [rad]

Seznam použitých zkratk

3D data	data vedoucí k získání 3D modelu snímaného objektu
2D kamera	(běžná) kamera s plošným senzorem
A/D	analogově digitální převodník
AFM	mikroskopie atomárních sil (atomic force microscopy)
AKC	chromniklová ocel podle evropské normy EN X8CrNi25-21
CCD	základní typ snímače pro viditelné spektrum (Charge-Coupled Device)
CMOS APS	základní typ snímače pro viditelné spektrum (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor Active Pixel Sensor)
CPU	centrální procesorová jednotka, mikroprocesor
Co	objektivní jakost corrugation testu
Cs	subjektivní jakost corrugation testu
EUV	extrémní ultrafialové elektromagnetické záření (10 až 100 nm)
EIT	elektrická impedanční tomografie (Electric Impedance Tomography)
FID	získaný signál indukovaného napětí (Free Induction Decay, také MRI signál nebo echo)
FIR	vzdálené infračervené elektromagnetické záření (15 000 až 1 000 000 nm)
FUV	daleké ultrafialové elektromagnetické záření (100 až 200 nm)
fps	počet snímků za sekundu (frames per second)
GPU	grafický procesor
HU	Hounsfieldova jednotka
IR záření	infračervené elektromagnetické záření
ISO	citlivost, zesílení signálu z optického snímače
LWIR	dlouhé infračervené elektromagnetické záření (8 000 až 15 000 nm)
LUT	vyhledávací tabulka (Look Up Table)
MRI	Magnetická rezonance (Magnetic Resonance Imaging)
MUV	střední ultrafialové elektromagnetické záření (200 až 300 nm)
MWIR	střední infračervené elektromagnetické záření (3 000 až 8 000 nm)
NIR	blízké infračervené elektromagnetické záření (750 až 1 400 nm)
NMOS	snímač pro UV oblast, negativní MOS (N-type metal-oxide-semiconductor)
NMR	jev nukleární magnetické rezonance (Nuclear Magnetic Resonance)
NUV	blízké ultrafialové elektromagnetické záření (300 až 390 nm)
Oo	objektivní jakost optického zvlnění
Os	subjektivní jakost optického zvlnění
PC	osobní počítač

px	pixel
RGB	barevný model
RF	radiofrekvenční impulz
ROI	oblast zájmu (Region of Interest)
RTG	rentgenové záření
SEM	rastrovací elektronový mikroskop
SMS	souřadnicový měřicí stroj
SWIR	krátké infračervené elektromagnetické záření (1 400 až 3 000 nm)
TEM	transmisní elektronový mikroskop
ToF	senzor vzdálenosti založený na detekci doby letu paprsku (Time of Flight)
TRC	koeficient tepelného odporu
UV záření	ultrafialové elektromagnetické záření
UVA	dlouhovlnné ultrafialové elektromagnetické záření (315 až 390 nm)
UVB	středovlnné ultrafialové elektromagnetické záření (280 až 315 nm)
UVC	krátkovlnné ultrafialové elektromagnetické záření (pod 280 nm)
VIS	viditelné elektromagnetické záření (390 až 750 nm)

Úvod

Strojové vidění je v současné době velmi dynamicky se rozvíjející oblastí, která zasahuje do aplikací nejen ve zdravotnictví a napříč průmyslovými odvětvími, včetně vojenského průmyslu, ale objevuje se v zařízeních pro komerční účely jako je ostraha majetku, výrobky denní spotřeby a zařízení pro hry. Strojové vidění se stává dostupnějším, efektivnějším, spolehlivějším, rychlejším a díky novým metodám získání a interpretace dat se objevují nové aplikace. Navíc v reálném nasazení v průmyslu se stává velmi silným nástrojem automatizace a úspory lidské práce. Přesto strojové vidění má svá specifika, kterými se od ostatních oblastí průmyslové automatizace liší. Znalosti, zkušenosti a invence jsou významným základem úspěchu při návrhu zařízení využívajícího strojového vidění. Všechny parametry budoucího zařízení není bohužel v současné době možné exaktně spočítat a nesprávný počáteční odhad může způsobit nezdar celého řešení. Důležité jsou proto znalosti a možnosti principů strojového vidění, které ovlivňují celou koncepci a následně konstrukci zařízení.

Strojové vidění je vědní obor, který se technickými prostředky snaží napodobit některé schopnosti lidského vidění (vnímání), proto tento pojem může být někdy omezován pouze na viditelné spektrum elektromagnetického záření, případně blízké oblasti infračerveného a ultrafialového záření. Ovšem nástroje pro následnou interpretaci získaného obrazu lze využít pro prakticky jakákoliv rastrovaná data. Tato data mohou být získána pomocí dalších spekter elektromagnetického záření i energií, které vytvářejí detekovatelné fyzikální pole.

Vzhledem k pokroku v tomto oboru je další, v současné době velmi frekventovanou problematikou, získávání 3D obrazových dat (dat obsahujících souřadnice jednotlivých bodů sledovaného objektu ve třech osách, rozměrech). Příkladem aplikace může být automatické hodnocení tvaru, vyhodnocení pozice a stavu objektů v technologické scéně, robotická manipulace, odebírání objektů z přepravky (tzv. bin picking), orientace servisního robotu v prostoru atd.

Pokud je objekt detekován na základě odrazu dané použité energie, jsou velmi důležité vlastnosti povrchu detekovatelného objektu ve vztahu k této energii. U detekce na základě odrazu je také důležité zvážit částečné pronikání zvolené energie sledovaným objektem, případně průchod (transmitance) energie objektem. Aktuální problematikou je proto také získání obrazových dat (ideálně ve 3D) objektů z transparentních materiálů. Problém s detekcí se objevuje také u objektů s lesklým povrchem. Tyto dva problémy, vyskytující se zvlášť nebo současně, činí praktické snímání 3D dat mnohem obtížnější. Přestože tyto problémy nejsou jediné při získání 3D dat, jsou dominantní a stále neuspokojivě řešeny. Tato problematika je tématem jedné z částí práce.

Získání obrazu (obrazových dat) sledovaného objektu je nejčastěji založeno na interakci

viditelného elektromagnetického záření s objektem, především odrazu od povrchu, pohlcení objektem a průchodem záření sledovaným objektem. Vedle tohoto záření ale existují i další možnosti získání obrazových dat pomocí různých principů založených na detekci vhodných fyzikálních polí. Pokud je objekt nebo jeho vady (na povrchu nebo uvnitř objektu) obtížně detekovatelný nebo není detekovatelný vůbec, je možné zvolit jiný snímač vhodného fyzikálního pole, který zajistí spolehlivou detekci. Tomuto problému se práce věnuje především po stránce teoretické.

Další aktuální problematikou je objektivní kvantifikace povrchové struktury a odraženého světelného vzoru na rozhraní, kde lze uplatnit nástroje fraktální geometrie spolu s dalšími matematickými nástroji. Uplatnění těchto silných nástrojů v průmyslové praxi může přinést výhody v rychlosti a uceleném objektivním hodnocení reálných povrchů. Toto téma začala rozvíjet již disertační práce autora a tato habilitační práce téma prohlubuje. V práci jsou představeny konkrétní aplikace pro výzkum a také možná aplikace ve výrobním procesu, včetně konstrukčního řešení.

Habilitační práce je připravována jako ucelená odborná publikace pro následné vydání ve formě monografie. První část je věnována obecnému popisu problematiky (kap. 3 a 4). **Odborná vědeckovýzkumná činnost** je uvedena v kap. 5 (včetně odkazů na odborné publikace v příloze, které prošly recenzním řízením). **Aplikační výstupy**, především ze zakázek od partnerů z průmyslu, jsou uvedeny v kap. 6.

1 Cíle práce

Zvolené téma habilitační práce vychází z poznatků dlouhodobého výzkumu a vývoje v rámci Katedry sklářských strojů a robotiky na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci. Velmi široké téma získání a interpretace obrazových dat je rozvíjeno s ohledem na problematiku katedry, tedy na materiál sklo a pořízení a zpracování obrazu spojené s robotikou a automatizací. V obou případech je často potřeba volit nejen pokročilé metody získání obrazových dat, ale také tato data správně interpretovat a získat z nich potřebné a spolehlivé informace. V neposlední řadě **je také třeba danému úkolu přizpůsobit konstrukci celého zařízení**, která musí být optimalizována tak, aby cíle detekce byly efektivně splněny s potřebnou mírou robustnosti systému.

Před definicí hlavních cílů habilitační práce je vhodné zmínit důvody, základní motivaci, proč je výzkum a vývoj v této oblasti veden a jaké jsou jeho perspektivy.

1.1 Motivace

Na základě dlouhodobých trendů lze vcelku jasně definovat současné směry ve vývoji zařízení pro získání obrazových dat a interpretaci takto získaných dat. Těmito směry jsou:

- získání a interpretace 3D dat snímaného objektu, případně snímané technologické scény,
- kompaktní systémy pro získání dat (inteligentní/smart kamery) s integrovanými nástroji pro snadnou parametrizaci software, který je použit pro interpretaci získaných obrazových dat,
- senzorová fúze (nebo data fusion, multisenzorika) obrazových dat s dalšími typy dat,
- komunikace zařízení pro získání obrazových dat v rámci ethernetu (sdílení získaných dat a/nebo informací),
- integrace prvků umělé inteligence do nástrojů pro získání a interpretaci dat
- a další.

Společným jmenovatelem pro dané směry jsou často aplikace pro řešení problematiky v rámci trendu, který je v ČR shrnut do Iniciativy Průmysl 4.0.

Vedle těchto směrů zůstávají i nadále otevřená a nedořešená témata, která souvisejí především s povahou snímaných objektů a problémem objektivní kvalifikace méně běžných typů dat. V rámci dlouhodobého výzkumu a vývoje na pracovišti autora této práce se objevila dvě základní témata, která jsou spojena s poptávkou v rámci průmyslových aplikací.

Jedná se o získání a interpretaci obrazových dat u objektů:

- z transparentního materiálu a objektů s lesklým povrchem,
- se strukturovaným povrchem.

Velkou výzvou pro získání spolehlivých dat jsou objekty z materiálů, které jsou ve viditelném optickém elektromagnetickém záření průhledné – transparentní. Příkladem je běžné sklo (na bázi oxidu křemičitého), ze kterého jsou produkovány výrobky ve velkých sériích se vzrůstajícím požadavkem na kvalitu. Příkladem mohou být automobilová skla, na která jsou kladeny stále se zvyšující nároky na přesnost. To vede i k požadavku na přesné systémy měření, kde vedle přesnosti je vyžadována také spolehlivost, rychlost a samozřejmě přijatelná cena. Jako vhodné se jeví bezkontaktní měření, které ovšem není možné realizovat běžnými prostředky pro získání obrazových dat (2D kamery pro viditelné spektrum optického elektromagnetického záření).

Problematické je také získání spolehlivých dat u objektů s lesklým povrchem. Získání obrazu je založeno na interakci elektromagnetického záření s objektem, především odrazu od povrchu, pohlcení objektem a průchodu sledovaným objektem. Nejčastější případ je využití reflexe, která je pak závislá, vedle zdroje elektromagnetického záření, také na vlastnostech povrchu. Ty lze charakterizovat v rozpětí dvou extrémů, kde prvním je ideální Lambertovský povrch (ideálně difúzní povrch) a druhým extrémem je ideální zrcadlový povrch. Pokud má objekt spíše Lambertovský povrch, je z hlediska získání obrazových dat relativně snadno zachytitelný a následně lze získaná data interpretovat. Komplikovanější situace vzniká při pořízení objektů s povrchem, který se blíží dokonale zrcadlovému. Takovéto povrchy se nazývají lesklé a získání vhodného obrazu pro jeho následnou interpretaci je podstatně obtížnější. V tomto případě je třeba získat data pomocí pokročilejších metod, ale také tato data náležitě interpretovat.

Jak se na základě rešerše (kap. 3 a kap. 4) ukazuje, existují potenciální metody pro snímání transparentních objektů a objektů s lesklým povrchem a metody pro neméně důležitou interpretaci získaných dat. Tento potenciál je v rámci výzkumu rozvíjen a jeho dílčí výsledky jsou uvedeny v této práci.

V mnoha průmyslových aplikacích je měření, tedy objektivní hodnocení, možné díky systému fyzikálních veličin standardizovaných v ISO. Jsou ovšem oblasti, kde klasické přístupy kvantifikace selhávají. Je to například hodnocení struktury povrchu, hodnocení získaných složitých křivek, komplexních dat ve formě časových řad atd. Strukturovanými daty se již zabývala disertační práce s názvem *Hodnocení průmyslových dat pomocí fraktálové geometrie* [1], která byla po úpravě publikovaná pod názvem *Metodika popisu průmyslových dat pomocí fraktální geometrie* [2]. V případě strukturovaných povrchů se lze setkat s podstatnými problémy při opakovaném získání snímků povrchů (vhodná metodika bez závislosti na dalších vlastnostech povrchu) a také při zpracování, kdy je nutné zvolit vhodné nástroje pro interpretaci kompletních informací o daném povrchu. Tato oblast byla proto motivací k dalšímu výzkumu a následně vývoji aplikací pro průmyslovou praxi.

Právě uplatnění metod v průmyslové praxi je stěžejní motivací, neboť obě zmíněné oblasti jsou aktuální a jejich řešení má velký technický potenciál pro uplatnění v reálných

provozech průmyslu. Odráží se zde i vliv poznatků na výsledný návrh a konstrukci zařízení.

1.2 Cíle práce u strukturovaných povrchů

Práce je zaměřena na problematiku kvantifikace charakteru získaných dat, jejich složitosti, pravidelnosti a dalších vlastností. Oproti běžným úlohám strojového vidění, které se zabývají převážně detekcí tvarů, barev, polohy, rozpoznáváním textu, kontrolou tvarů, je cílem zaměřit se na méně obvyklé hodnocení textur, jakosti povrchu, složitosti struktur. Cílem práce je definovat a ukázat možnosti objektivizace použitelné v průmyslové praxi a aplikovaném výzkumu.

V rámci práce jsou rozvíjeny oblasti spojené s obrazovými daty, kdy je popisována vyvinutá metodika pro získání, zpracování a vyhodnocení dvou typů dat:

- křivky rozhraní a
- obrazu (2D),

kteřá jsou doplněna o analýzu dat popisujících profil. Princip jednotlivých nástrojů pro interpretaci dat (metodik) je pro tyto typy dat rozdílný. Každá z uvedených metodik se v aplikacích používá především jako software pro hodnocení, ale metodiky mají i své „hardwarové“ požadavky pro získání dat, jako jsou požadavky na osvětlení sledovaného objektu, parametrů použitých snímačů (kamer nebo fotoaparátů), snímacích dotykových prvků atd.

Cílem je vývoj metodiky získání a interpretace dat ze strukturovaných povrchů, která zajistí, aby data a následné informace byly objektivní, zároveň spolehlivé a kompletní, kap. 4.3 a kap. 5.

1.3 Cíle práce u objektů z transparentních materiálů a materiálů s lesklým povrchem

Na základě zjištění současných technických možností je cílem ***specifikovat vhodné fyzikální principy získání obrazových dat objektů z transparentních materiálů a materiálů s lesklým povrchem.*** Především se jedná o principy, které jsou v současném stavu techniky použitelné s ohledem na požadovanou přesnost, rozlišení, spolehlivost a použitelnost v praxi. Získaná data musí dále umožnit jejich interpretaci tak, aby získaná informace byla použitelná pro následné zpracování. Informace může být ve formě virtuálního 2D nebo 3D modelu, který může být použit například pro zjištění odchylek od požadovaného tvaru objektu nebo posouzení tvaru a jeho zařazení do dané třídy, kap. 3, kap. 4.4 a kap. 6.

1.4 Cíle práce v oblasti aplikací

Výše uvedené cíle habilitační práce jsou orientovány především na fyzikální principy, podmínky získání obrazových dat a na metodiku interpretace získaných dat. Nicméně, důležitá je pro tuto práci také aplikace řešených principů a metodik v praxi. Technické podmínky získání dat a konstrukční provedení zařízení je často kritickým místem možné aplikace v reálných průmyslových podmínkách, ať přímo na výrobní lince nebo v průmyslových laboratořích. Zdárné vyřešení dílčích podmínek spojených s danou aplikací často rozhoduje o celém úspěchu daného přístupu k řešení.

Cílem práce je teoreticky řešenou problematiku přivést do použitelného stavu v praxi, včetně konstrukčního řešení. V rámci habilitační práce jsou proto některé z aplikací přímo uplatnitelné v praxi. Příkladem je především automatická detekce zvlnění plochého skla (tzv. corrugation test, kap. 5.2), aplikace bin picking (kap. 6.7.1), získání 3D dat pomocí konfokálních snímačů (kap. 6.5) a také již technicky zvládnutá metodika analýzy křivek rozhraní povrchu sledovaného materiálu (kap. 5.1) použitelná v průmyslových laboratořích.

Cílem bylo vytvořit ucelenou publikaci s logickým členěním, širokým záběrem uvedených poznatků a cílenými ukázkami možných aplikací včetně rozboru možností detekce transparentních materiálů.

1.5 Výchozí znalosti a zkušenosti

Práce je výsledkem výzkumu v oblasti dané problematiky od roku 1998. Základem jsou poznatky a závěry z mezinárodního projektu NOVISCAM [G1], který byl součástí iniciativy COPERNICUS Evropské Unie a probíhal od února roku 1997 do konce roku 2000 a autor této práce se ho účastnil. Cílem projektu NOVISCAM byla specifikace nového modulárního optického měřicího systému, který lze použít pro kontrolu a řízení rozsáhlé skupiny rychlých a chaotických procesů, které jsou těžko říditelné běžnými kontrolními prostředky. Vyvinutý systém využívá méně obvyklých měř, jako je například fraktální dimenze.

Výzkum se dále zaměřil na posouzení možností využití nástrojů fraktální geometrie v kombinaci se statistickými nástroji pro popis dat z průmyslové praxe. Byla vyvinuta metodika pro hodnocení tří typů dat: časových řad, 2D snímků (digitálních fotografií a snímků z elektronového mikroskopu) a křivek rozhraní (profilů, drsnosti a rozhraní světla a stínu). Pro každý typ dat byl aplikován modifikovaný přístup vycházející z obecných poznatků fraktální geometrie a statistiky. Ukázalo se, že navrhovaná metodika hodnocení dat nepřináší univerzální řešení výrobních problémů, ale pouze objektivní kvantitativní popis dat, který má fyzikální podstatu ve výrobě. Nedílnou součástí výzkumu se stal rovněž vývoj vhodných softwarových nástrojů uplatnitelných v praxi, které mají vědecký základ a přitom splňují požadavky průmyslových aplikací, tj. jednoznačnost, rychlost, přesnost zpracování a srozumitelné vyjádření výsledků. Habilitační práce tak navazuje na obhájenou disertační práci [1], která byla po úpravě publikovaná jako odborná kniha [2].

Výzkum byl po obhájené práci především zaměřen na aplikace spojené se získáním a následným zpracováním obrazových dat a právě poznatky a výsledky z těchto aplikací jsou mimo jiné předmětem této práce. Výsledky výzkumu jsou podpořeny několika články v impaktovaných časopisech [P1–P3, P5] (které jsou přílohou této práce). Je tak rozvíjena a zobecňována metodika s použitím fraktální geometrie spolu s dalšími matematickými nástroji. Problematika byla doplněna o rozsáhlou analýzu povrchů získaných různými technologiemi obrábění a opracování z průmyslové praxe a následné hodnocení limit použití metodiky v praxi. Důležitým návazným krokem ve vztahu k disertační práci autora je také upřesnění metodiky a výběr vhodných nástrojů pro detekci. Dalším je matematický nástroj pro nalezení koeficientů pro přepočítání na jedno směrodatné číslo pro hodnocení jakosti.

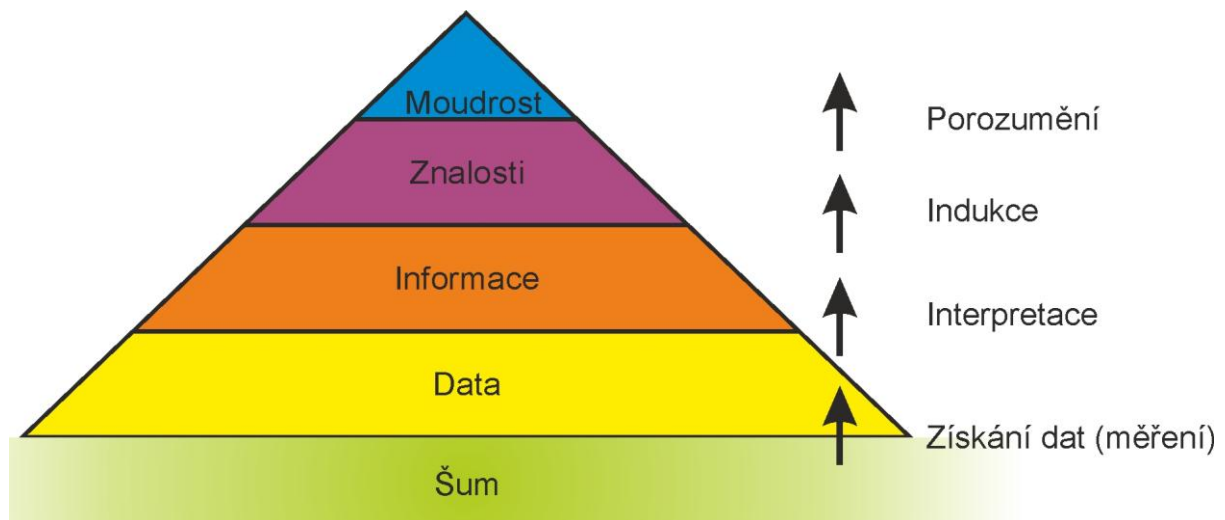
Práce se také u metodiky zpracování a analýzy obrazu odkazuje na skripta s názvem *Úvod do problematiky strojového vidění (1. a 2. díl)* [3, 4]. Učební texty jsou určeny pro výuku předmětu *Snímání a zpracování průmyslových dat*, který je součástí navazujícího magisterského studijního programu *Strojní inženýrství N2301*. Používaná jsou také tato skripta pro výuku předmětu *Metody zpracování dat a obrazu v medicínské praxi*, který je součástí navazujícího magisterského studijního programu *Biomedicínské inženýrství N3963*. Habilitační práce se také v některých částech prolíná a odkazuje na disertační práci doktoranda Ondřeje Matúška [5]. Ta se zabývá především dvěma přístupy získání a následnou interpretací obrazových dat vedoucích k třírozměrným virtuálním modelům.

Na téma získání a interpretace obrazových dat byla vedle hlavního výzkumu, směřovaného k výzkumnému záměru [G2, G6], grantům financovaných a spolufinancovaných z veřejných zdrojů [G8, G11, G15, G19], průmyslovým grantům [G5, G7, G10, G18, G17, G21, G22, G25, G26, G28] a zakázek [G14], řešena také dílčí témata, bakalářské [6, 7] a diplomové práce [8]. Při výzkumu probíhala spolupráce se studenty bakalářského, magisterského a doktorského studijního programu. Bylo využito jak pomocných vědeckých sil, tak i dílčích úkolů v rámci studentské grantové soutěže [G9, G13, G20, G23, G27] a institucionálního programu [G16, G24], kde je jedním z hlavních směrů problematika strojového vidění.

Důležitým podpůrným prvkem vědeckovýzkumné činnosti je vybudování laboratoře robot vision, která v současné době disponuje desítkami kamer pro viditelné, infračervené i ultrafialové záření, 3D kamerami, konfokálními snímači, širokou škálou osvětlovačů různých vlnových délek s řídicími jednotkami, laserů a projektorů, několika počítači a notebooky pro připojení kamer, stínícím boxem, mnoha stativy a konstrukčními prvky, pracovištěm pro testování bezkontaktních technologií, přesnými stolky s mikroposuvem a nakloněním, celou škálou propojovacích a podpůrných prvků atd. Jedná se tak o velmi kvalitní pracoviště, které umožňuje provádět výukové aktivity, výzkum a vývoj v rámci grantů a projektů a také vyvíjet aplikace pro průmyslovou praxi.

2 Definice pojmů

V práci je často uváděn pojem získání a interpretace dat. Pojem je zaveden na základě **znalostní (datové) pyramidy**, která je používána především v měkkých vědách, jako jsou informační systémy, management znalostí nebo informační management [9]. Jedná se o informační model, vysvětlující strukturní a funkční vztahy mezi daty, informací, znalostí a moudrostí. Její používaný akronym je DIKW – data, information, knowledge, wisdom. Tato pyramida je často rozšířená o šum, ze kterého je nutné data získat, Obr. 2.1. Schéma je autorem práce upraveno a také rozšířeno o procesy, které vedou k posunu o úroveň výše.



Obr. 2.1 Znalostní pyramida rozšířená o šum a procesy vedoucí k posunu o úroveň výše

Šum představuje všechny signály a všechny veličiny fyzikálních polí, které se v daném okamžiku v detekované oblasti (oblasti měření) vyskytují. Pro **získání dat** jsou v technické praxi používány přístroje a zařízení, které sledují vybrané signály a fyzikální pole v daném rozsahu, provádějí měření. Z dat jsou **interpretovány informace**, které mohou být dále použity bytostmi nebo stroji. Získaná data použitá pro interpretaci obsahují také další data, která pro získání informace nejsou potřebná a naopak získání informace ztěžují, neboť použitelná data překrývají (jsou to „data ve formě šumu“). Informace jsou v průmyslové praxi použity pro získání stavu a řízení výrobního procesu. Jen omezeně jsou používány pro **získání znalostí**. Nicméně na základě **indukce**¹ získává operátor, řídící daný proces, znalosti, které může použít pro zlepšení efektivity řízení výrobního procesu. Trend je i v této oblasti zavádět automatické expertní systémy, umožňující získávat znalosti o daném systému a

¹ Obecně je indukci míněno usuzování z jednotlivého na obecné, nebo přesněji řečeno jde o poznání, které vychází z empiricky zjištěných faktů a dospívá k obecným závěrům, je opakem dedukce [10].

řízení procesu zlepšovat. Významnou roli v této oblasti může sehrát umělá inteligence. Posledním krokem je **porozumění znalostem**, ze kterého vyplývá **moudrost** nebo též meta-znalosti.

Pro aplikace strojového vidění je pak důležité, aby v získaných obrazových datech byla obsažena informace, kterou je potřeba získat a nebyla příliš překryta daty ve formě šumu. Tato podmínka se zdá být zcela triviální, ale právě na ní ztroskotalo již mnoho aplikací. Cílem je pak tuto podmínku splnit v reálných podmínkách za přiměřených nákladů.

Předkládaná práce se zabývá získáním obrazových dat (měřením) a jejich interpretací (získáním informace).

Fyzikálním polem se rozumí prostorové rozložení určité fyzikální veličiny, kdy je každému bodu prostředí přiřazena hodnota fyzikální veličiny, přičemž se může jednat i o rozložení této veličiny v látce.

Na úvod je také třeba stanovit **kartézské souřadnice** používané v této publikaci. Osy x , y , z a souřadnice v těchto osách budou používány pro skutečný prostor, který je předmětem snímání. Souřadnice v osách u , v a případně w budou používány pro získaný obraz a následně vytvořené modely, podobně jako je tomu v učebních textech [3, 4].

Habilitační práce je zaměřena na tzv. **obrazová data**. V této práci tento pojem vyjadřuje rastrová data, která umožňují bezprostředně vytvářet vizuálně interpretovatelný obraz. Rastr (síť) přitom může být ve formě topologicky dvojdimenzionálního prostoru (2D, plošný rastr), topologicky trojrozměrného prostoru (3D, třírozměrný rastr) anebo jejich kombinace s časem. Obrazová data jsou v práci také nazývána jako obraz (což jsou vizualizovaná obrazová data). Dále používaný pojem obraz má širší význam nežli zde také používaný pojem snímek. Obraz i snímek vizualizují obrazová data, která představují změřený signál získaný ze snímačů. **Snímek** lze chápat jako samostatný záznam signálů získaný v daném časovém údobí. **Obraz** může navíc obsahovat i časovou informaci (další rozměr signálu), kterou samostatný snímek neobsahuje. Obraz tak může být složen z několika samostatných snímků.

Pojem **snímač** je v tomto textu použit pro označení zařízení pro sejmutí přicházející energie. Jedná se o element citlivý na určitou formu energie v určitém rozsahu, který dokáže kvantifikovat tuto energii dopadající převážně na jeho povrch. Pojem snímač představuje v tomto textu kompletní zařízení, na jehož výstupu je již digitalizovaný signál. Jedná se o český ekvivalent ke slovu senzor.

Obrazová data jsou získávána z okolního šumu pomocí převážně bezdotykových snímačů. Data jsou kvantovaná (nabývají určitých hladin hodnot) pouze v určitém, konečném, rozsahu. Hodnoty, kterých získaná obrazová data nabývají, odpovídají množství/změně naměřené energie zobrazené v daném rastru, hodnoty jsou tak spojeny s měřenou veličinou. Pro získání obrazových dat je možné použít různých principů, kap. 3.

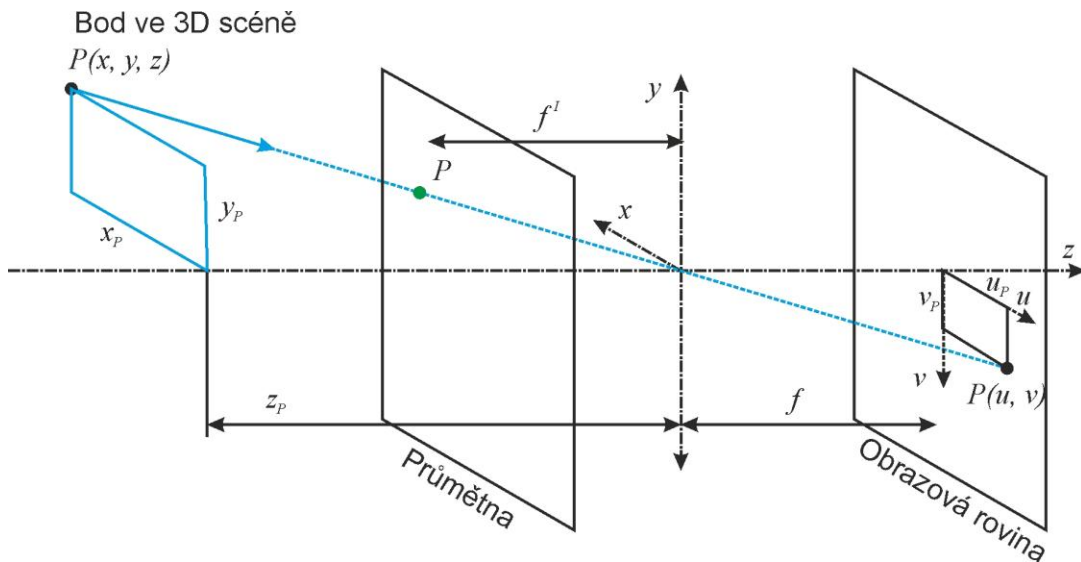
V práci je také použit pojem kamera pro snímač optického záření, ačkoliv v praxi se lze setkat s pojmem např. gama kamera, což je již zařízení pro snímání elektromagnetického záření s vlnovou délkou mnohem kratší než je optické záření.

Svět je možné označit za třírozměrný z hlediska topologie (3D). Získaný obraz je často z topologického hlediska dvojrozměrný (2D). Je to v případě plošného senzoru, který je v praxi používán nejčastěji. Obrazová funkce (obraz ze snímače nebo na sítnici oka) je výsledkem perspektivního zobrazení neboli středového promítání, které je v jednoduchém přiblížení modelováno dírkovou komorou, Obr. 2.2.

Bod P má souřadnice v osách x, y, z ve 3D scéně a f je vzdálenost obrazové roviny od středu promítání (u objektivů je obrazová rovina umístěna ve vzdálenosti odpovídající ohniskové vzdálenosti). Bod promítaný do 2D obrazové roviny má souřadnice v osách u, v . Z podobnosti trojúhelníků platí pro perspektivní zobrazení:

$$u_P = \frac{x_P f}{z_P}, v_P = \frac{y_P f}{z_P} \quad (2.1)$$

Perspektivní zobrazení dané tímto vztahem je nelineární a někdy se nahrazuje ortografickým zobrazením neboli paralelním zobrazením, které vznikne za podmínky $f \rightarrow \infty$.



Obr. 2.2 Geometrie perspektivního promítání, model tzv. dírkové komory [3]

Zobrazením z 3D do 2D světa se zabývá **projektivní geometrie** [11, 12], která zkoumá vlastnosti, jež se nemění u projektivních transformací (kolineací). Model pro tuto geometrii je obvykle projektivní rovina anebo projektivní prostor. V této geometrii jsou definovány body a přímky, nikoliv ale úhly a vzdálenosti. Pojmu obrazová rovina odpovídá v této geometrii pojem průmětna, což je plocha v prostoru, na kterou dopadají promítací paprsky a v místě dopadu vytvářejí průmět (obraz v rovině). Vzhledem k tomu, že obrazová rovina zobrazuje převrácený obraz, lze si průmětnu představit jako rovinu předsunutou před střed promítání a posunutou o ohniskovou vzdálenost $f' = f$. Je zde také zaveden pojem promítací paprsek, což je přímka vedená promítaným (prostorovým) bodem, jejíž směr závisí na promítací metodě. V zásadě se rozlišuje perspektivní promítání jednobodové, dvoubodové a třibodové.

Obraz může být modelován matematicky pomocí spojitě skalární funkce f_b dvou až čtyř proměnných, která je nazývána obrazovou (jasovou) funkcí. Tato obrazová funkce je reprezentována maticí obrazové funkce \mathbf{f}_b . Statický obraz (snímek) s plošným rastrem (2D obraz) je popsán obrazovou funkcí dvou souřadnic $f_b(u, v)$ v rovině (obecněji v ploše, např. na přibližně kulové ploše sítnice lidského oka). Obraz tak představuje obrazovou funkci ve formě dvojrozměrné matice \mathbf{f}_b , kde jejími prvky jsou obrazové elementy nazývané pixely (picture element). Pokud se jedná o obraz s plošným rastrem zachycený v čase t , pak obrazová funkce má tři proměnné $f_b(u, v, t)$. Tři proměnné má také obrazová funkce v případě obrazů s třírozměrným rastrem (3D obrazů), tj. $f_b(u, v, w)$. Obraz pak představuje obrazovou funkci ve formě trojrozměrné matice, kde jejími prvky jsou obrazové elementy nazývané voxely (volumetric element). Speciálním případem je obrazová funkce se čtyřmi proměnnými pro prezentaci 3D obrazů v čase $f_b(u, v, w, t)$.

Interpretace obrazových dat znamená získání požadovaných informací převážně na základě nástrojů analýzy obrazových dat (analýzy obrazu), kap. 4.

V textu je často zmiňován pojem **objekt**, představující oblast(i) v obrazu, která je (jsou) předmětem zájmu. Okolí objektu je pak nazýváno jako pozadí. Objekt může mít díry, které jsou součástí pozadí. Objekt a pozadí spolu tvoří **technologickou scénu**. K tomu, aby bylo možné objekt a pozadí oddělit, musí být data náležitě interpretována. Tato interpretace však nemusí sama o sobě přinést potřebné informace, je tak třeba dalších nástrojů zpracování obrazu.

V kap. 5.1, kap. 5.2 a kap. 5.4 je používáno pojmu **křivka rozhraní**, kterým je tak myšleno obecně topologicky jednodimenzionální rozhraní dvou materiálů (např. slitiny a skloviny) nebo též křivka profilu, profil materiálu, vlnitosti či drsnosti povrchu, rozhraní světla a stínu apod. Křivka rozhraní je dále analyzována pomocí fraktální dimenze (kap. 4.3) a dalších statistických nástrojů.

V textu se také často vyskytuje **pojem sklo**, což je látka ve skelném stavu, zahrnuje širokou škálu skel různého složení a vlastností. V textu této práce je pojmem sklo myšleno běžně vyráběné sklo na bázi oxidu křemičitého (křemičité sklo) obvyklých složení pro běžně používané výrobky.

V práci je často také odkazováno na sklářské technologie. Často je používán pojem **sklovina**, což je sklo ve stavu taveniny, ve stavu, ve kterém ještě nedošlo k transformaci. Sklovina se od určité viskozity (při zvyšování teploty) začíná chovat viditelně plasticky a je možné ji tavit, dávkovat a následně tvarovat. Při ochlazování skloviny se po transformaci začíná jednat o sklo, tedy o tuhou formu tohoto materiálu. Hranicí mezi sklem a sklovinou je tzv. transformační interval, kdy sklovina při ochlazování přechází nejprve do stavu metastabilního (přechlazené kapaliny) a následně skelného tuhnutí (kdy dojde k transformaci) až po sklo. Vzhledem k tomu, že transformace je závislá na rychlosti ochlazování (respektive zahřívání), mluví se o transformačním intervalu [13].

Vlnová délka elektromagnetického záření je uváděna přednostně v nm.

3 Současné možnosti získání obrazových dat

V této části práce jsou popsány možnosti získání obrazových dat. Obecně lze konstatovat, že většinu dat získaných v plošném nebo třírozměrném rastru lze vyjádřit jako vizuálně interpretovatelný obraz. Tato data lze tedy zpracovávat nástroji obrazové analýzy, a to jak pro jediný snímek (staticky), tak v obraze (v čase, více v kap. 4).

Tato část je teoretická, proto veškeré znalosti a rovnice jsou přejaté z uvedených zdrojů v textu anebo jsou natolik obecné, že není třeba odkazovat na zdroj. Rozdělení a třídění je pak dílem autora této práce.

Obrazová data lze získat z mnoha typů snímačů, které používají různé druhy energie (různé veličiny) a různé způsoby pořízení. V zásadě lze obrazová data získat pomocí:

- bodových snímačů,
- řádkových (liniových) snímačů,
- plošných snímačů,
- trojrozměrných (3D) snímačů.

Ve své podstatě všechny snímače získávají data v bodech, které tvoří rastr, ale rozdílná je doba jejich pořízení. U plošných snímačů a 3D snímačů jsou data v bodech získána současně v jeden časový okamžik (přesněji během definovaného časového úseku). V případě bodových a řádkových snímačů je nutné zajistit posuv senzorů nebo sledovaného objektu na přesně stanovené pozice s odpovídající přesností polohování a také zajistit synchronizaci získaných obrazových dat s polohou snímače, respektive objektu. V případě požadavku 3D dat je nutné i u plošných snímačů zajistit získání třetího rozměru.

V současné době se čím dál více akcentuje propojení více snímačů dohromady. Jedná se o tzv. sensor fusion (senzorová fúze, nebo také multisenzorika). Jedná se o kombinaci senzorických dat nebo dat získaných z různých zdrojů tak, že výsledná informace má méně nejistoty, než by bylo možné dosáhnout, kdyby byly tyto zdroje použity jednotlivě. Informace tak může být přesnější, úplnější, spolehlivější nebo může být rozšířena. Například použití dvou kamer za účelem stereo vidění (kap. 4.4.2.3) poskytne navíc informaci o hloubce předmětu na základě dvou 2D obrazů, čehož by se u samostatných kamer nedosáhlo. Podobně je možné využít rastrovaných obrazových dat a ta rozšířit o data z bodových senzorů, která po interpretaci přinesou doplňující informaci o hloubce předmětu v určitém místě (kap. 6.7.1.5).

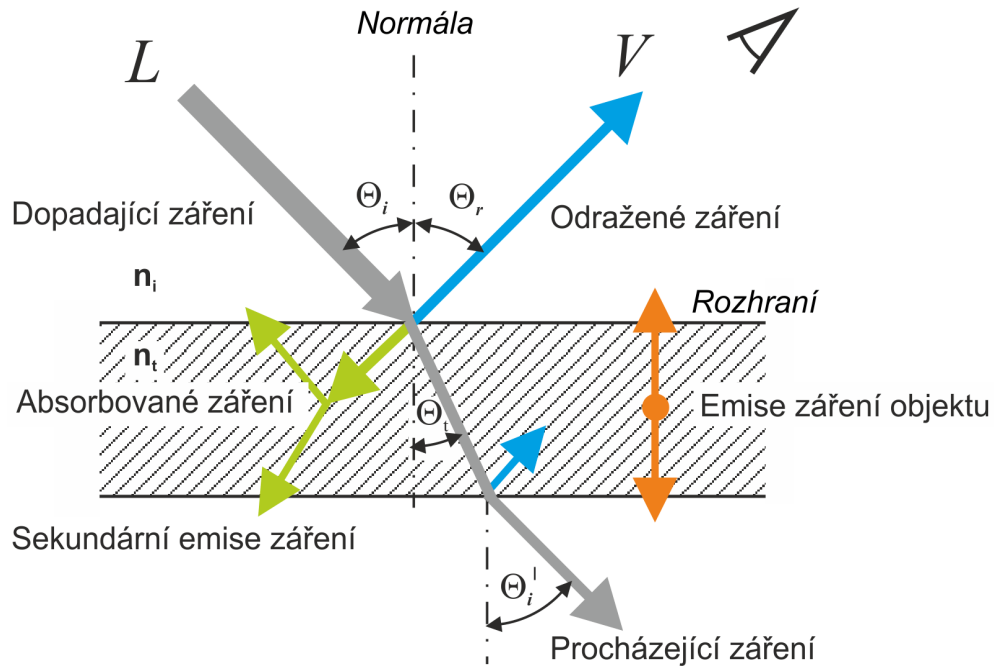
Obrazová data je možné obecně získat pomocí následujících druhů energie (tedy detekcí fyzikálních polí těchto energií):

- 1) **Energie elektromagnetického záření** od gama záření, přes rentgenové záření a ultrafialové záření (UV), po viditelné záření (VIS), infračervené záření (IR), mikrovlny až po radiové vlny, kap. 3.1.
- 2) **Energie záření částic**, jako jsou elektrony (využíváno u elektronového mikroskopu) a neutrony, kap. 3.2.
- 3) **Atomární síly**, snímače umožňují detekci Van der Waalsovy a elektrostatické síly mezi snímacím hrotem a sledovaným vzorkem, kap. 3.3.
- 4) **Mechanická energie akustických vln**, kdy rychlost šíření akustických vln je přímo úměrná elastickým vlastnostem média, kterým prostupuje (např. princip sonaru, nebo též lékařská sonografie), kap. 3.4.
- 5) **Elektrická energie**, např. konduktivita prostředí, kdy různé prostředí za různých podmínek má rozdílnou schopnost vést elektrický proud (principu využívá elektrická impedanční tomografie), kap. 3.5.
- 6) **Mechanická energie** např. kontaktní odměřování a odměřování pomocí změny proudění tekutin, kap. 3.6.
- 7) **Magnetická energie spolu s energií elektromagnetického pole** (radiových vln) je využívána u nukleární magnetické rezonance, kap. 3.7.

Výčet zahrnuje relativně běžně používané metody získání obrazových dat (pořízení obrazu) a není absolutní. Jednotlivé energie a jejich využití pomocí měření fyzikálních veličin (fyzikálních polí) jsou v následujícím textu krátce popsány. Výčet je zaměřen na problematiku snímání objektů z transparentních materiálů, materiálů s lesklým povrchem (s důrazem na následné získání 3D modelu) a povrchových struktur.

3.1 Elektromagnetické záření

Při studiu možností detekce objektů (získání obrazových dat) je vhodné si uvědomit základní jevy, ke kterým dochází při dopadu elektromagnetického záření na povrch objektu a za jakých podmínek dochází k emisi záření samotného objektu. Při dopadu elektromagnetického záření se část záření od sledovaného objektu odráží, část se absorbuje (pohltí), část způsobí v materiálu objektu sekundární emisi záření a část záření může projít. Část záření je emitována (vyzářena) samotným objektem, Obr. 3.1. Tyto jevy se uplatňují na základě vlastností objektu (např. povrchových vlastností, materiálových vlastností, jeho teploty) a vlastností elektromagnetického záření, které na objekt dopadá (především vlnová délka). Uvedené jevy se týkají celého spektra elektromagnetického záření a se změnou vlnové délky se mění i míra uplatněných jevů při interakci záření s objektem.



Obr. 3.1 Základní jevy při dopadu elektromagnetického záření na sledovaný objekt [3]

3.1.1 Odraz záření

Podle zákona odrazu platí, že úhel odrazu se rovná úhlu dopadu

$$\theta_r = \theta_i \quad (3.1)$$

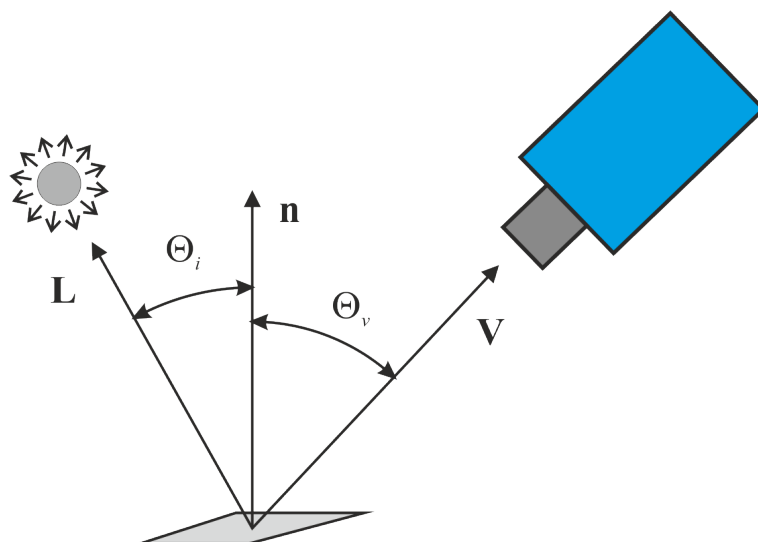
Koeficient odrazivosti nebo také **albedo** vyjadřuje, jaký podíl dopadající energie je odražen zpět do prostoru [14]:

$$R(\lambda) = \frac{E_r(\lambda)}{E_i(\lambda)} \quad (3.2)$$

kde $E_i(\lambda)$ je intenzita záření [W m^{-2}] dopadajícího na plošku povrchu scény a $E_r(\lambda)$ je intenzita vyzářená zpět do prostoru po odrazu [W m^{-2}], λ je vlnová délka elektromagnetického záření [nm]. Koeficient závisí na vlnové délce dopadajícího elektromagnetického záření, vlastnostech povrchu plošky (míra absorpce záření), na třech úhlech popisujících vzájemný vztah mezi směrem ke zdroji světla L , směrem k pozorovateli V , lokální orientací danou normálou n , Obr. 3.2. Kosiny těchto tří úhlů lze napsat jako skalární součin vektorů, proto je **funkce odrazivosti** R_F popsána pomocí tří skalárních součinů:

$$R_F = R_F(n \cdot L, n \cdot V, V \cdot L) \quad (3.3)$$

Odraz záření (reflexe) je používán především v oblasti viditelného záření a je tak základem detekce objektů pomocí „běžných kamer“. Pro získání obrazových dat je nejčastěji využívaným fyzikálním polem.



Obr. 3.2 Popis směrových vektorů ke zdroji elektromagnetického záření a pozorovateli [3]

3.1.2 Absorpce a propustnost záření

Důležitou vlastností ovlivňujících odraz je absorpce záření látkou, ze které je sledovaný objekt složen. Část dopadajícího elektromagnetického záření je vždy objektem pohlcena a jen část je následně odrážena nebo látkou prochází.

K absorpci dochází na základě pohlcení fotonu odpovídající frekvence atomem (respektive molekulou) látky a přechodu atomu (molekuly) do vyššího energetického stavu.

Propustnost souvisí s absorpcí a vychází z Lambert-Beerova zákona. Kvantitativně lze propustnost elektromagnetického záření látky vyjádřit tzv. koeficientem propustnosti $T_p(\lambda)$ (propustnost, transmittance), který je dán poměrem intenzity záření $[W\ m^{-2}]$ ze vzorku vystupujícího $E_t(\lambda)$ a světla vstupujícího $E_i(\lambda)$:

$$T_p(\lambda) = \frac{E_t(\lambda)}{E_i(\lambda)} \quad (3.4)$$

Vztahuje se na jednotkovou tloušťku a při vynásobení stem je získána propustnost látky v procentech.

Intenzita záření procházejícího látkou se v důsledku jeho částečného pohlcování snižuje. Množství propuštěného záření závisí na druhu látky, tloušťce této látky a na vlnové délce záření. Jestliže k absorpci dochází rovnoměrně v celém sledovaném spektru, pak se spektrální složení záření vystupujícího z látky nemění, ale dojde pouze ke snížení intenzity prostupujícího záření (neutrální absorpce). U viditelného záření nedochází ke změně barvy procházejícího světla. Jestliže dochází k absorpci záření pouze určité vlnové délky v daném spektru vlnových délek, pak záření po průchodu zkoumanou látkou má odlišné spektrální složení. U viditelného záření tak dochází ke změně barvy. Tento jev existuje u barevných skel, kde je tato selektivní absorpce způsobena obvykle již nepatrnou přísadou barvicí složky v základní hmotě skla.

3.1.3 Emise záření

Opakem absorpce je spontánní emise záření. Jedná se o přechod atomu (resp. molekuly) látky z vyššího energetického stavu do stavu nižšího, při kterém atom (resp. molekula) vyzáří foton. Jednotlivé atomy (molekuly) při tomto přechodu emitují nekoordinovaně fotony, které mají různou vlnovou délku a fázi, vznikající elektromagnetické záření je nekoherentní. Spontánní emise může být spojitá v dané oblasti vlnových délek, nebo nespojitá a pak je rozeznávána čárová nebo pásová emise záření.

Absorpce a spontánní emise jsou vlastně procesy opačné a oba stejně pravděpodobné. Jde jen o to, bude-li více atomů na vyšší energetické hladině (pak převládne spontánní emise) nebo na nižší energetické hladině (v tom případě převládne absorpce).

Spontánní emise záření je využitelná pro získání dat pro látky, jako je sklo (pro taveninu skla se používá pojem sklovina), s teplotou nad 525 °C. (Teplota 525 °C odpovídá začátku viditelnosti absolutně černého tělesa, běžné materiály jako sklo musí mít teplotu ještě vyšší.) Při dávkování skloviny (u běžné sodnovápenatodraselné skloviny okolo 900°C) jsou teploty natolik vysoké, že ke spontánní emisi záření dochází ve velké míře ve viditelném spektru. Spontánní emise záření je také detekovatelná v infračervené oblasti pro nižší teploty a tedy lze využívat snímačů IR záření.

Existuje také stimulovaná emise, kdy foton o vhodné vlnové délce dopadá na atom (resp. molekulu) ve vyšším energetickém stavu a přiměje ho k přechodu do nižšího stavu za vyzáření dalšího fotonu. Původní foton se přitom nepohlí a oba fotony se pohybují společně dále stejným směrem jako foton, který emisi vyvolal. Jsou synchronizovány, mají stejnou frekvenci a stejnou fázi. Jedná se tedy o koherentní záření.

3.1.4 Lom záření

Pro materiály, které jsou pro danou vlnovou délku (spektrum vlnových délek v optickém záření) propustné (transparentní), je důležitou vlastností lom záření na rozhraní, distorze (pro spektrum vlnových délek), rozptyl a další vlastnosti. V tomto případě tak do problematiky získání obrazových dat vstupují další vlastnosti a pořízení obrazu vhodného pro následnou interpretaci dat podstatně ztěžují.

Dopadá-li paprsek z prostředí indexu lomu n_i na rozhraní, které je odděluje od prostředí indexu lomu n_t , dělí se obecně na dva paprsky. Jeden zůstává v prostředí indexu lomu n_i (paprsek odražený) – jedná se o odraz (reflexi), druhý se láme do nového prostředí – jedná se o lom (refrakci).

Lom světla je možno definovat jako změnu směru a rychlosti paprsku při jeho průchodu optickým rozhraním. Matematicky lze poměr indexů lomu vyjádřit jako poměr sinu úhlu dopadu paprsku a sinu úhlu lomu téhož paprsku podle Snellova zákona:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{n_t}{n_i} \quad (3.5)$$

Prochází-li paprsek z prostředí opticky řidšího do opticky hustšího, tedy $n_i < n_t$, pak $\theta_t < \theta_i$ paprsek se láme ke kolmici. Naopak, prochází-li z prostředí opticky hustšího do opticky řidšího, pak $\theta_t > \theta_i$ paprsek se láme od kolmice. V tomto druhém případě při určitém úhlu dopadu θ_{im} dochází k tomu, že úhel lomu je $\theta_t = 90^\circ$. Jedná se o tzv. mezní úhel dopadu nebo také kritický θ_{im} , při kterém ještě dojde k lomu. Pro úhly dopadu větší, než je mezní úhel θ_{im} , se veškeré světlo od rozhraní odráží; tento jev je nazýván *úplný* nebo *totální odraz*.

Lom optického záření je opět významnou vlastností skel. Z pohledu chemického složení se hodnoty indexu lomu u běžných křemičitých skel pohybují pro viditelné spektrum v rozmezí 1,48 až 1,56. Střední hodnota používaná při orientačních výpočtech je 1,5. Pro kratší vlnové délky se index zvyšuje, pro delší vlnové délky se index snižuje.

Je důležité si uvědomit, že odraz, absorpce, index lomu a další optické vlastnosti se mění se změnou vlnové délky záření. Například v oblasti vlnových délek pod 200 nm (jedná se o UV záření) jsou běžná skla zcela neprůhledná, dochází k absorpci tohoto záření.

3.1.5 Vliv energie záření na interakci s hmotou

Způsob interakce elektromagnetického záření s látkou určuje především jeho energie (vlnová délka). "Měkké" elektromagnetické záření delších vlnových délek (nizkých energií) se chová především jako vlna, která v hmotném prostředí interaguje kolektivně s větším počtem elektronů či atomů (které rozkmitává), což v případě světla vede k optickým jevům odrazu a lomu světla. Při interakci s atomem zasáhne kmitající elektromagnetické pole buď celý elektronový obal, nebo jeho větší část, přičemž vzhledem k pomalejšímu průběhu interakce vazbové síly elektronů stačí "odvést" excitaci na celý atom. Takto se chová velká část tzv. optického záření.

Se zkracováním vlnové délky, tedy zvyšováním energie elektromagnetického záření, získává záření „fotonový charakter“, přičemž fotony mají vlastnosti volných bodových částic poměrně vysoké energie. Takové fotony pak interagují, tedy sráží se individuálně s jednotlivými elektrony, a to buď volnými, nebo vázanými v atomech. Při vyšších energiích se proto uplatňují „přímé kolize“ fotonů s elektrony („bodově lokalizované“ fotony mohou v atomech zasahovat jednotlivé elektrony přímo, bez ovlivnění okolních orbitalů v atomovém obalu). Vzhledem k velmi krátké době, po kterou je foton "v kontaktu" s elektronem, nestačí vazbové síly elektronů "převést" excitaci na zbytek atomu.

Na straně elektronů způsob interakce záleží na tom, zda je elektron volný, či jak silně je vázán v atomovém obalu. Pro volné nebo slabě vázané elektrony má interakce většinou charakter přímé „kolize“ fotonu s elektronem a výsledkem je rozptyl. Foton se tak „odrazí“ do jiného směru a jeho energie se sníží o hodnotu, kterou předal elektronu. S elektrony silně vázanými v atomovém obalu však foton může interagovat do určité míry „kolektivně“. Primární foton je nejprve pohlcen elektronovým obalem, vytvoří se přechodný vzbuzený stav, který se vzápětí spontánně rozpadá a přijatou energii emituje – buď opět jako sekundární foton, nebo v podobě kinetické energie uvolněného elektronu.

Běžné rentgenové a gama záření nižších energií (desítky či stovky keV) interagují prakticky výhradně s elektronovým obalem atomů. Jejich interakce s jádrem má velmi malou pravděpodobnost. Teprve při energii nad 5 MeV se výrazněji uplatňuje interakce s jádrem [15].

3.1.6 Pojem expozice

Pro získání požadovaného obrazu je třeba zvolit správné nastavení snímače, které umožní získání požadovaných informací o sledovaném objektu. Expozici představuje množství detekované (dopadlé) energie na snímač (buňku snímače), která je změřena, následně zesílena a převedena z analogového signálu na digitální. Pojem expozice je spojován především s elektromagnetickým zářením, ale lze ho použít i na další typy energií, které vedou k získání obrazových dat. Je to například u záření částic (elektronů i ionizujícího záření). U zvukového vlnění (ultrazvuku), elektrického pole a u magnetické rezonance lze tento pojem použít ve zjednodušené podobě.

Obecně lze expozici ovlivnit několika faktory. Tím hlavním je citlivost daného snímače, která je dána především jeho fyzikální podstatou, s čímž souvisí i možnost zesílení tohoto signálu. Mezi snímačem a sledovaným objektem jsou často umístěny filtry, různé formy clon a soustava čoček (materiálových nebo magnetických), které ovlivňují také množství energie směřující na snímač. Dalším důležitým faktorem je množství přivedené vnější energie, která je ve snímači následně detekována. S expozicí je spojena její doba, tedy jak dlouho je dopadající energie snímána. Doba expozice představuje u elektromagnetického záření především množství elektronů, které byly excitovány dopadajícími fotony. U záření kratších vlnových délek a také u záření částic je používáno scintilátorů², který převede dopadající energii na elektromagnetické záření většinou ve spektru VIS.

3.1.7 Optické záření

Do optického záření je zahrnuto elektromagnetické záření v intervalu vlnových délek 10^{-8} až 10^{-3} m. V tomto rozsahu vlnových délek leží VIS (390 až 750 nm)³, IR záření (750 nm až 1 000 000 nm) a UV záření (10 až 390 nm), [16].

3.1.7.1 Povrch objektů a jejich odraz

Jak již bylo výše konstatováno, u optického záření je důležitou vlastností odraz, který je pro detekci objektů využíván nejčastěji. K odrazu dochází od povrchu, který má vlastnosti

² Jedná se o materiál, který převádí elektromagnetické záření krátkých vlnových délek a záření elektronů na elektromagnetické záření většinou ve spektru VIS. Princip je založen na excitaci elektronu do vyššího energetického stavu zářením, přičemž návrat elektronu do základního stavu se projeví jako světelný záblesk.

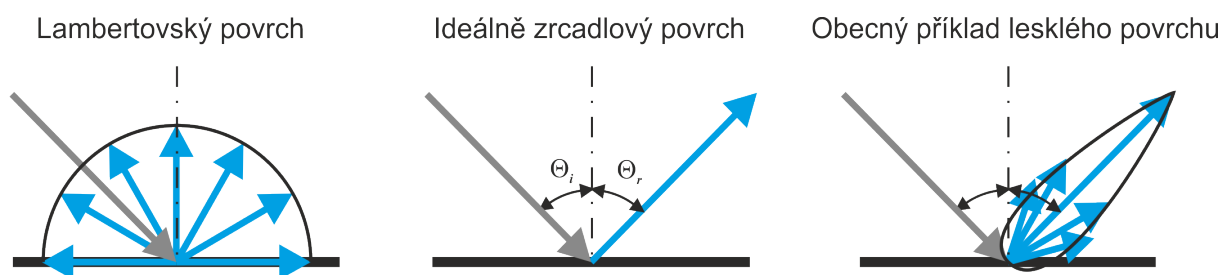
³ V různých publikacích se uváděný interval vlnových délek, na které je citlivé lidské oko, může nepatrně lišit. Důvodem jsou různé podmínky, za kterých bylo příslušné měření prováděno (složení testovací skupiny lidí, jejich stáří, únava, ...). Použit je rozsah uvedený v [16].

uvedené mezi dvěma extrémy:

Lambertovský povrch (také ideálně matný, ideálně difúzní povrch) odráží světelnou energii rovnoměrně do všech směrů, Obr. 3.3. Zář (jas) ze všech směrů je konstantní (nezávisí na směru pohledu). Příkladem takového povrchu pro střed viditelného spektra je bílý piják s koeficientem odrazivosti 0,8, bílý psací papír 0,68, bílý strop nebo žlutý papír 0,6, tmavě hnědý papír 0,14 a tmavý samet 0,004.

Ideální zrcadlový povrch odráží ozáření na základě zákona odrazu, Obr. 3.3. Vlastní povrch není vidět, ale ukazuje jen zdánlivý zrcadlově převrácený obraz zdrojů elektromagnetického záření.

V některých publikacích je také uváděn **lesklý povrch**, který je ale již kombinací lambertovského povrchu a ideálně zrcadlového povrchu, Obr. 3.3. Velká část záření je odrážena na základě zákona odrazu, ale částečně je odraz difúzní, blíží se tak spíše povrchu zrcadlovému.



Obr. 3.3 Odraz od povrchu objektu

Pro odraz od povrchu objektu je důležitá také absorpce povrchu, která přímo ovlivňuje intenzitu odraženého záření (kap. 3.1.2) Obecnější popis odrazivosti objektů lze najít například v literatuře [3, 14].

3.1.7.2 Problematika odrazu a lomu na optickém rozhraní vzduchu a skla

V této práci je řešena problematika získání obrazových dat z odrazu paprsku viditelného záření od povrchu propustného (transparentního) materiálu, běžného křemičitého skla. Míra odraženého paprsku je závislá na úhlu dopadu a polarizaci dopadajícího záření, což je pro návrh experimentů a následně provozního zařízení velmi důležité (kap. 5.2 a kap. 6.6).

K odrazu a lomu dochází v rovině dopadu [16A]. Složka paprsku, která se odráží, je dána koeficientem odrazivosti R a složka, která se láme a projde, je dána koeficientem propustnosti T_p . V případě, kdy světlo dopadá a odráží se ve směru normály (úhel dopadu $\theta_i \approx \theta_r \approx 0$), platí pro koeficient odrazivosti R_n

$$R_n = \left(\frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \right)^2 \quad (3.6)$$

Pro běžné sklo ve vzduchu platí, vzduch $n_i \approx 1$ a sklo $n_t = 1,5$. Pak je odraženo okolo 4 % původně dopadajícího záření (koeficient odrazu $R_n = 0,04$). Při kolmém průchodu světla

skleněným předmětem (deskou) se však světlo odráží jak na povrchu při vstupu do předmětu, tak na povrchu při výstupu. Kombinaci obou koeficientů odrazu R_{n2} lze přibližně získat z rovnice:

$$R_{n2} = \frac{2R_n}{(1+R_n)} \quad (3.7)$$

a pak se dle výpočtu odráží asi 7,7 % původně dopadajícího záření. Přesto při použití ideálně čirého skla (bezbarvého, bez absorpce) projde skleněnou deskou pouze asi 92,3 % kolmo dopadajícího světla (koeficient propustnosti $T_p = 0,923$). U skel s vyšším indexem lomu je množství prošlého světla ještě menší.

Koeficient odrazivosti se bude zvyšovat s úhlem dopadu a bude ovlivněn i polarizací záření. Po zjednodušení Fresnelových rovnic je pro polarizované záření v rovině kolmé na rovinu obrázku (Obr. 3.1) odrazivost dána rovnicí

$$R_{\perp} = \left(\frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \right)^2 \quad (3.8)$$

a v případě, že polarizované záření je v rovině rovnoběžné s rovinou obrázku, je koeficient odrazivosti dán rovnicí

$$R_{\parallel} = \left(\frac{n_i \cos \theta_t - n_t \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \right)^2 \quad (3.9)$$

S použitím Snellova zákona

$$\theta_t = \arcsin \left[\left(\frac{n_i}{n_t} \right) \sin \theta_i \right] \quad (3.10)$$

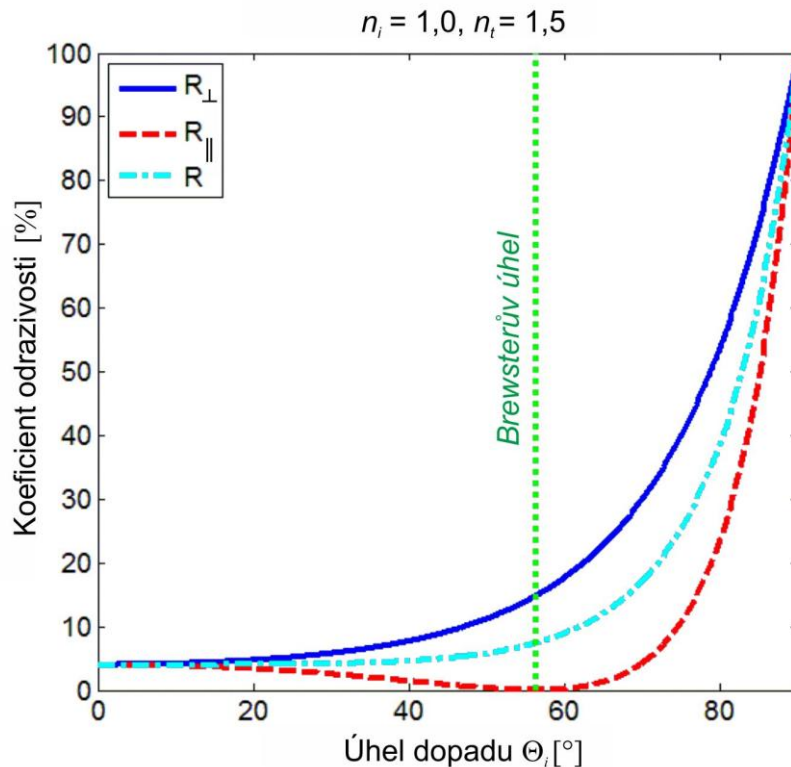
lze odrazivost R_{\perp} a R_{\parallel} kompletně odvodit z úhlu dopadu θ_i . V případě, že záření je nepolarizované, platí

$$R = \frac{R_{\perp} + R_{\parallel}}{2}. \quad (3.11)$$

Závislost koeficientu odrazivosti (v procentech) na úhlu dopadu a polarizaci záření (bez uvažování absorpce) je uvedena na Obr. 3.4.

Jak je zřejmé z Obr. 3.4, koeficient odrazivosti skla se zvyšuje se vzrůstajícím úhlem dopadu záření. Ovšem stále při úhlu dopadu paprsku $\theta_i = 40^\circ$ je koeficient odrazivosti 4,6 % (oproti 4 % při $\theta_i = 0^\circ$) pro nepolarizované záření. Ke zdvojnásobení koeficientu odrazivosti na 8 % dojde pod úhlem $\theta_i = 57,9^\circ$ a trojnásobný koeficient (12 %) je pod úhlem $\theta_i = 64,9^\circ$. Vzhledem k tomu, že k odrazu dochází také od spodní strany skla, je koeficient odrazivosti ještě vyšší.

Koeficient odrazivosti je dále vyšší, pokud je polarizované světlo v rovině kolmé na rovinu obrázku. Pro úhel $\theta_i = 40^\circ$ je koeficient odrazivosti 7,2 %, při úhlu $\theta_i = 60^\circ$ je koeficient 17,7 % a při úhlu $\theta_i = 80^\circ$ dokonce 53,9 %.



Obr. 3.4 Závislost koeficientu odrazivosti R (rozhraní vzduchu a skla, v procentech) na úhlu dopadu θ_i a polarizaci záření, pro vzduch $n_i \approx 1$ a sklo $n_t = 1,5$ [17]

V případě, že je dopadající světlo polarizováno v rovině rovnoběžné s rovinou obrázku, koeficient odrazivosti R_{\parallel} klesá do Brewsterova úhlu, při jehož dosažení světlo dokonale prochází skrz povrch, pak koeficient roste. Brewsterův úhel θ_B je definován vztahem

$$\theta_B = \arctg\left(\frac{n_t}{n_i}\right) \quad (3.12)$$

Jak vyplývá z rovnic, koeficient odrazu vedle úhlu dopadu závisí také na indexu lomu. Index lomu pak závisí na chemickém složení látky (skla), na jeho teplotě a na vlnové délce záření, které na látku dopadá.

3.1.7.3 Snímače optického záření

Viditelné elektromagnetické záření má vlnovou délku v rozsahu 390 až 750 nm, čemuž odpovídá energie 1,7 až 3,2 eV (elektronvolt).

Samotné získání obrazových dat pomocí optického elektromagnetického záření je ve své podstatě radiometrické měření za použití vhodných snímačů, které jsou citlivé na sledované spektrum záření. Podmínkou zůstává uspořádání jednotlivých buněk v senzoru do vhodného rastru, ten je nejčastěji volen ve dvojrozměrném maticovém uspořádání. Jednotlivé „buňky“ snímače (odborně nazývány pixely) měří dopadající záření v daném časovém intervalu. Získaná data, která lze využít po náležité interpretaci k identifikaci objektů a měření některých vlastností, jsou:

- vlnová délka elektromagnetického záření (vlnová délka je u lidského oka vnímána jako barva),
- amplituda, tj. intenzita záření (jas),
- mód polarizace pro příčné vlny,
- fáze, kterou je ovšem možné měřit jen v případě koherentních zobrazovacích technik, jakými je interferometrie a holografie.

Nejčastěji je snímači pro optické záření měřena intenzita a vlnová délka elektromagnetického záření.

Na základě radiometrického měření je možné dané intenzitě záření (jasu) přiřadit fyzikální význam. Ve strojovém vidění, které využívá optického elektromagnetického záření, je hodnota obrazové funkce f_b chápána nejčastěji jako odhad záře L [$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$], která vznikla odrazem optického záření od povrchu scény. Obecně řečeno, jas (intenzita optického elektromagnetického záření E [W m^{-2}]) v daném pixelu závisí na tvaru objektu, odrazových vlastnostech jeho povrchu, poloze snímače (pozorovatele), poloze a typu osvětlení, optice objektivu a optických filtrech.

Radiometrické měření je prováděno pomocí vhodných snímačů. V současné době neexistují snímače, které by pokryly celé široké spektrum optického elektromagnetického záření. Z tohoto pohledu je vhodné rozdělit snímače podle spektra, ve kterém jsou schopny intenzitu záření detekovat, na snímače pro VIS záření (nazýváno též světlem), snímače pro UV záření a snímače pro IR záření.

3.1.7.4 Snímače viditelného záření

Snímače VIS (světla) jsou fotonovými senzory záření, které se používají od 70-tých let 20. století a lze je rozdělit do dvou skupin:

- 1) Snímače na fotoemisivním principu využívající vnější fotoelektrický jev. Přijetím fotonu je poskytnut dostatek energie, aby se uvolnil volný elektron. Principu bylo využíváno ve vakuových snímacích elektronkách a fotonásobičích.
- 2) Snímače na fotovoltaiickém nebo fotovodivostním principu se rozšířily s rozvojem polovodičů a využívají vnitřní fotoelektrický jev. Na tomto principu jsou založeny mimo jiné dva základní typy snímačů pro reálné průmyslové nasazení. Starší je označován CCD (Charge-coupled device), mladší a v poslední době stále více používaný, CMOS APS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Active Pixel Sensor). Dalšími modifikacemi jsou například snímače BSI CMOS, CID atd.

V praxi jsou dnes nejčastěji používány snímače CMOS APS spolu s CDD snímači. Oba pracují na stejném principu, kdy foton po interakci s atomem dokáže přemístit některý z jeho elektronů ze základního do excitovaného stavu. V polovodiči je možno uvolněný valenční elektron přitáhnout k přiloženým kladným elektrodám, které jsou ale od polovodiče izolovány. Vznikají tak potenciálové jamky (miniaturní obrazové buňky), které jsou následně vyčítány, zesíleny a digitalizovány. Digitalizace signálu představuje kvantování podle požadované datové hloubky, tedy na požadovaný počet úrovní jasu. Jestliže je pro získání obrazových dat o obrazovém elementu (pixelu) použito b bitů, je počet úrovní jasu $k_j = 2^b$.

Jedná se o **radiometrické rozlišení**. V současné době většina kamer pracuje s 10 až 12 bity na pixel. U 10 bitů, respektive 12 bitů monochromatického obrazu lze na jednom pixelu získat 1 024, respektive 4 096 úrovní jasu. Pro většinu aplikací ovšem postačuje u monochromatického obrazu 8 bitů na pixel, což představuje 256 hodnot. Rozdíl mezi CCD a CMOS APS je ve vyčítání elektronů. U CCD snímáče je použit posuvný registr a buňky jsou postupně vyčítány, zesilovány a pomocí A/D převodníku je signál digitalizovaný. U CMOS APS jsou buňky snímáče vyčítány přímo. Snímáč funguje na principu použití tranzistoru, kdy každá buňka má svůj zesilovač a A/D převodník. Může být díky tomu přímo adresována a čtena pomocí jejích X, Y souřadnic na snímáči. Obecně, CCD snímáče mají vyšší citlivost, vyšší dynamický rozsah, menší šum a vyšší fill factor⁴. CMOS APS snímáče mají menší spotřebu, jsou rychlejší a levnější, Tab. 3.1. Více informací lze najít v odborné literatuře [3, 14].

Tab. 3.1 Porovnání snímáčů CCD a CMOS APS [3]

Parametr	CCD	CMOS APS
Signál vystupující z pixelu	Paket elektronů	Napětí
Signál vystupující z čipu	Napětí (analogový signál)	Bity (digitální signál)
Rychlost	Nízká, sekvenční čtení	Vysoká, maticově adresované buňky
Citlivost	Velmi dobrá, lze dosáhnout kvalitního obrazu, lepší barevná věrnost snímků	Za snížených světelných podmínek může být problém dosáhnout kvalitního zobrazení, horší rozlišení barev
Dynamický rozsah	Vysoký	Průměrný
Šum	Malý, velká kvalita obrazu	Je větší s ohledem na nižší fill factor (část světlocitlivé buňky je zakryta elektronikou)
Odběr energie	Odebírá více (uvádí se až 50 x více než CMOS APS)	Relativně malý
Složitost čipu a náklady na vývoj	Menší	Velké
Složitost systému	Velká, mnoho obvodů je mimo čip	Menší, většina obvodů je přímo na čipu
Cena	Vysoká, jedná se o specializovanou výrobní technologii	Levnější, je využíváno standardní technologie výroby logických obvodů

⁴ Fill factor je poměr plochy citlivé části buňky (fotodiody) vůči celkové ploše buňky. Pojem se používá i v jiných oblastech techniky.

Další alternativou snímačů je například BSI CMOS (backside-illumination), [18]. Princip spočívá v přesunutí vrstvy s kovovými obvody a tranzistory na opačnou stranu křemíkového substrátu, tedy pod světlocitlivou vrstvu. Hlavní výhodou je vyšší fill factor. Zmínit je také možné snímač CID (Charge Injection Device), kde princip je obdobný jako v případě CCD senzoru, ale buňky mohou být přímo adresovány. V PN přechodu je vytvořena potenciálová jáma, která je plněna nábojem vznikajícím vnějším dopadajícím zářením. Po odpojení napětí z elektrody, které vytvářelo potenciálovou jámu, je nábojový balík odsát do substrátu odkud je pak dále zpracován [18].

Uvedený fyzikální princip, který využívá polovodičů na bázi křemíku, má širší rozsah detekovaných vlnových délek než má lidské oko. Konkrétně je uváděn rozsah spektra 300 až 1000 nm. V případě náhrady některých částí snímače (např. sklíček z běžného skla sklíčky z křemenného skla) je rozsah již od 160 nm, tedy v oblasti blízkého UV záření, kap. 3.1.7.6. Senzory jsou také citlivé i na blízké infračervené záření (NIR), kap. 3.1.7.7. Záření vlnové délky NIR nejsou viditelná lidským okem, v pořízeném obrazu se tak mohou objevit nečekané odrazy. V případě vyšší intenzity NIR záření může dojít snadno k přetečení kapacity jednotlivých obrazových buněk a přebytečné elektrony se pak roztečou do okolních buněk (pixelů). Výsledkem je znehodnocený snímek. Pro záznam pouze ve VIS oblasti spektra je proto používán IR-cut filtr, který odfiltruje záření z NIR oblasti a zabrání infračervené složce, aby se uplatnila v získaných obrazových datech. IR-cut filtry mohou výrobci umístit přímo na ochranné sklíčko umístěné před senzorem (u monochromatických kamer) nebo na barevné filtry u kamer pro snímání v barevné škále. Tyto filtry mohou být také umístěny v optice objektivu.

Dalším důležitým pojmem je závěrka, která je většinou dvojího typu. Celková závěrka (global shutter) se vyznačuje tím, že senzor je vystavován světlu v jediném časovém okamžiku. Obrazová data z horní, střední a dolní části senzoru jsou přenášena téměř současně. Rolovací závěrka (rolling shutter, line scan) je většinou levnější a na rozdíl od celkové závěrky dochází k načítání jednotlivých řádků s buňkami (celého snímku) postupně shora dolů. Protože je snímek načítán postupně v řádcích, ale je zobrazován vcelku, mohou být kolmé hrany pohybujícího se objektu zobrazené na výsledném snímku jako šikmé. Senzory s rolovací závěrkou jsou levnější, ale nejsou vhodné pro úlohy s pohybem kamery nebo při pohybu ve snímané technologické scéně.

V současné době je v průmyslové praxi nejrozšířenější využití monochromatických kamer (kamer snímajících v šedé škále). Vedle měření jasu, je možné získat i informace o vlnové délce, přesněji získat barevnost sledovaných objektů v podobném vyjádření tak, jak je vnímá lidské oko. Pro získání barevného obrazu je možné využít dvou základních principů: tříčipové uspořádání a jednočipové s barevným filtrem.

Tříčipové uspořádání je založeno na rozložení bílého denního světla na primární barvy červenou (R), zelenou (G) a modrou (B) soustavou optických hranolů se dvěma polopropustnými (dichromatickými) zrcadly s nanesenými barevnými filtry [3]. Tato optická soustava rozdělí obraz na obrazy pro tři CCD snímače, které zaznamenávají jednotlivé barevné složky obrazu. Výsledkem je tak prostorová matice o třech hladinách.

Výhody tohoto řešení jsou plné rozlišení RGB snímků a vysoká citlivost, protože světlo je zpracováno v původní podobě jeho jednoznačnými charakteristikami. Naopak nevýhodami jsou vysoká cena, větší rozměry a hmotnost, v neposlední řadě požadavek speciální (dražší) optiky.

Jednočipové snímání s barevným filtrem je založeno na umístění šachovnicového vzoru přímo před jednotlivé pixely jediného snímače. Většinou je využíváno tří základních barev modelu RGB, kde problém s uspořádáním do matice je řešen pomocí barevných filtrů, nejčastěji tzv. Bayerova filtru. Filtr má dvojnásobný počet zelených buněk oproti buňkám červeným a modrým. Důvodem je, že lidské oko je nejcitlivější na žlutozelenou barvu a informace o této barvě je tak pro lidské oko nejdůležitější. Obraz se načte běžným způsobem a teprve dalším zpracováním se plnohodnotné barvy jednotlivých pixelů interpolují z nejbližších pixelů jednotlivých barev RGB, nejčastěji ze sousedních 4 pixelů. Při detailním pohledu jsou pak drobné detaily „rozpité“. Pokud by se interpolace neprovedla, je výsledné rozlišení jen třetinové. S tím je spojena i nižší citlivost, protože 2/3 spektra jsou na každé buňce odfiltrovány (např. modrá a zelená pro červený filtr). Pro redukci tohoto problému je možné využít rozložení na tzv. doplňkové barvy (komplementární), což jsou azurová, purpurová a žlutá (CMY). Filtr z doplňkových barev odfiltruje 1/3 spektra (např. modrou pro žlutý filtr), proto je tento senzor dvakrát citlivější. Na druhou stranu je výpočet hodnot R, G, B poněkud složitější, což zvyšuje míru šumu [19]. Existují i další řešení, která jsou zmíněna v [3].

Kamery lze obecně dělit podle tvaru snímacího prvku na:

- 1) Plošné kamery, které mají snímací body umístěné v matici [3]:
 - a) standardní (běžné kamery);
 - b) inteligentní (kamera v sobě zahrnuje pokročilý hardware a software pro zpracování snímků a výstupem jsou vedle obrazu výsledky obrazové analýzy);
 - c) kamerové senzory (kamera v sobě zahrnuje jednoduchý hardware a software pro zpracování snímků, ale výstupem je jen logický výstup – ano/ne, tedy například výrobek přítomen/nepřítomen nebo kvalitní/nekvalitní).
- 2) Řádkové kamery (liniové nebo také lineární kamery), které mají snímací body v jedné až čtyřech liniích [3].
- 3) 3D kamery (kap. 4.4).

Digitální fotoaparáty mají logicky výhradně plošné senzory. Naproti tomu skenery mají liniové uspořádání.

Parametry současných kamer umožňují široké uplatnění v praxi, a to i s ohledem na klesající ceny. Mezi základní charakteristiky kamer s plošným senzorem patří typ snímače (nejčastěji CCD nebo CMOS APS). Dalším parametrem je již zmíněná **datová hloubka snímače** (počet úrovní jasu) [3].

Velmi důležitým a často přehlíženým parametrem je **velikost snímače**, tento parametr významně ovlivňuje citlivost a tím i míru šumu. Větší snímač při stejném rozlišení má větší buňky, na které dopadá více záření, což vede k nižšímu šumu a obraz je tak kvalitnější. Na druhou stranu je nutné počítat s vlivem ohniskové vzdálenosti objektivu představeného před

snímač na zorný úhel a tím i na zorné pole. Velký snímač potřebuje pro dosažení stejného zorného úhlu objektiv s delší ohniskovou vzdáleností. S prodlužováním ohniska objektivu také klesá hloubka ostrosti, což v některých technických aplikacích může být nežádoucí. Velikost snímače je uváděna v palcích a jedná se o hodnotu, která nekoresponduje přímo s velikostí snímače, pro přepočet je potřeba použít tabulky, Tab. 3.2, [3]. Obecně je u průmyslových aplikací trend ke zmenšování velikosti snímače při stejném plošném rozlišení (běžně 1/2" až 2/3", více se uplatňují senzory velikosti 1"). Pro praktické využití je potřeba si uvědomit, že senzory s menší světlocitlivou buňkou vyžadují intenzivnější osvětlení.

Tab. 3.2 Velikosti běžně užívaných optických snímačů

Typ	Poměr Š:V [-]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Diagonála [mm]
1/6"	4:3	2,300	1,730	2,878
1/4"	4:3	3,200	2,400	4,000
1/3.6"	4:3	4,000	3,000	5,000
1/3.2"	4:3	4,536	3,416	5,678
1/3"	4:3	4,800	3,600	6,000
1/2.7"	4:3	5,270	3,960	6,592
1/2"	4:3	6,400	4,800	8,000
1/1.8"	4:3	7,176	5,319	8,932
2/3"	4:3	8,800	6,600	11,000
1"	4:3	12,800	9,600	16,000
4/3"	4:3	18,000	13,500	22,500

Plošné rozlišení, tedy vzorkování, je vzdálenost mezi nejbližšími snímanými (vzorkovacími) body v obraze (obrazovými buňkami, pixely). Otázku plošné vzorkovací frekvence (vzdálenosti vzorkovacích bodů) řeší Shannonova věta o vzorkování [14]. Z věty vyplývá, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvakrát větší než nejvyšší zajímavá frekvence ve vzorkovaném signálu. V případě použití nižší vzorkovací frekvence (nižšího rozlišení) může dojít k tzv. aliasingu [11, 12]. O rozlišení snímače tak primárně rozhoduje požadovaná přesnost měření. Vzhledem ke zmíněným podmínkám, musí být rozlišení alespoň dvakrát vyšší než požadovaný nejmenší měřitelný rozměr. Nicméně tato teoretická přesnost a s ní související opakovatelnost měření je snižována vlivem šumu v obraze, ztrátovou kompresí obrazových dat a dalšími vlivy. Je tak třeba počítat s rezervou, která závisí jak na snímaném objektu, tak nabídce senzorů s patřičným rozlišením. Zkušenost ukazuje, že pro zpracování obrazu je třeba vzorkovat minimálně 5krát jemněji, než je teoretická mez daná vzorkovací větou. Rozlišení by tak mělo být minimálně pětikrát větší než je teoretická mez. Běžné průmyslové kamery dnes mají plošné rozlišení okolo 5 Mpx, existují ovšem i kamery s rozlišením 47,5 Mpx (7 920 x 6 004 pixelů), [20]. Při tomto rozlišení je třeba řešit přenos velkého objemu dat z kamery do vyhodnocovací jednotky, což je řešeno

několikanásobným rozhraním Camera Link nebo CoaXPress. V současné době je špičkou v rozlišení kamera hr120CCX, která má plošné rozlišení 120 Mpx (13 272 x 9 176 pixelů), velikost senzoru 29,18 x 20,19 mm [21], při rychlosti snímání 9,3 fps pro 4 linie CoaXPress.

Časové rozlišení snímačů nebo také frekvence či rychlost snímání je důležitý parametr při získávání snímků z relativně rychlých procesů. Při volbě kamery je tak třeba znát rychlost procesu, který bude snímán a s rezervou zvolit příslušnou kameru. Frekvence snímání se uvádí v počtu snímků za sekundu (fps – frames per second). V současné době se běžně hodnoty pohybují od 3 fps (barevné kamery s 16 Mpx CCD senzory, např. u kamery JAI AB-1600CL) až po 750 fps („rychlomkamery“ s rozlišením VGA, výhradně CMOS APS snímače). Běžná frekvence snímání u kamer s plošným rozlišením 5 Mpx se pohybuje v současné době od 10 do 250 fps, což je postačující pro většinu průmyslových aplikací. Některé kamery umožňují rychlý záznam pouze ve zvolené oblasti zájmu (ROI, Region of Interest). Příkladem může být kamera Basler acA2500-60um s větším snímačem (1“), která při specifikaci ROI 640 x 480 může zaznamenat až 978 snímků za sekundu.

Dalším důležitým parametrem je použité rozhraní (interface) pro komunikaci kamery s vyhodnocovací jednotkou. Dostupných je několik typů rozhraní, každý nabízí trochu jiné vlastnosti a hodí se pro jiný typ aplikací. Výběr kamery do jisté míry závisí na možnostech komunikace se systémem pro zpracování obrazu. Někdy výrobce kamer nabízí stejný model ve dvou a více variantách lišících se právě typem připojení, o jeho volbě rozhoduje především:

- rychlost přenosu dat, tedy objem dat, který je odeslán do počítače za danou časovou jednotku,
- latence, tedy zpoždění mezi pořízením snímku a jeho zobrazením/doručením ke zpracování,
- vzdálenost, na kterou mají být data přenesena (vzdálenost mezi počítačem a kamerou),
- způsob napájení (komunikační rozhraní může zajistit i napájení kamery),
- zpoždění příkazů (přicházejících z počítače do kamery a obráceně, důležité především při snímání rychlých procesů),
- možnost připojení více kamer (je-li vyžadována),
- zatížení procesoru CPU nebo GPU,
- cena a další.

Dnes se používají tyto typy rozhraní: USB 3.0, Gigabit Ethernet (GigE Vision), Camera Link a CoaXPress. Starší rozhraní jsou: USB 2.0, FireWire (IEEE 1397 a/b) a analogové.

Přenosová rychlost **USB 3.0** je až 4 800 Mb/s, což představuje teoreticky šířku pásma až 600 MB/s. Zvýšená je i možnost napájení kamery (vyšší příkon přes USB rozhraní) až 0,9 A oproti USB 2.0. Délka kabelu mezi kamerou a vyhodnocovací jednotkou je 4,5 m bez zesilovače. Hlavní výhodou je velmi snadné zapojení těchto kamer. Ve srovnání s USB 2.0 byla správa komunikace vylepšena a nabízí tak vyšší spolehlivost přenosu dat a významně nižší zátěž CPU počítače. Většina portů USB 3.0 umožňuje použití DMA (Direct Memory Access) pro minimalizaci zátěže procesoru při přenosu velkých objemů dat. Podobně jako u

gigabitového ethernetu, byl i pro USB 3.0 vyvinut protokol nazvaný USB3 Vision, aby bylo možné kamery spolehlivě použít v systémech strojového vidění jako real-time zařízení. Kompatibilita s USB3 Vision a GenICam⁵ umožňuje vzájemné připojení systémů a kamer různých výrobců bez nutnosti změny ovladačů nebo aplikace [3, 22].

GigE Vision rozhraní se uplatňuje při připojení více kamer a (nebo) na delší vzdálenost mezi kamerou a počítačem. Výhodou je snadné připojení, kdy kamera se chová jako standardní síťové zařízení, je tak možno k počítači s jedinou síťovou kartou připojit desítky kamer zapojených v ethernetové síti. Další výhodou je, že pro komunikaci lze použít standardní ethernetovou kabeláž kategorie 5e nebo 6 a klasické aktivní síťové prvky (NIC, switch, hub). Lze se také setkat s GigE kamerou napájenou po ethernetu, tzv. PoE tedy (Power over Ethernet). Lze také využít vzdálené připojení například přes VPN nebo přes Wi-Fi. Nevýhodou je vyšší zatížení procesoru počítače a delší odezva při spouštění expozice softwarovým triggerem.

Pro velká rozlišení a vysoké rychlosti snímání (plošné snímáče v řádech stovek snímků, nebo ve vysokém rozlišení, řádkové kamery) je již kapacita gigabitového ethernetu nedostatečná, proto se používá sběrnice **Camera Link** s přenosovou rychlostí až 6 800 Mb/s. Řadu malých kamer je možné přímo napájet z rozhraní Camera Link (PoCL). Nevýhodou Camera Linku je nutnost použít speciální kartu (frame grabber) do PC a omezená délka kabelů na 10 m (s možností prodloužení na 30 m se zesilovači).

Rozhraní **CoaXPress** [23] využívá koaxiální kabel, který umožňuje přenášet data v pásmu šířky 780 MB/s na vzdálenost 40 metrů a 390 MB/s na vzdálenost 100 metrů a k tomu lze využít pro řízení kamery 2,5 MB/s. Je-li potřeba navýšení přenosové rychlosti, stačí zapojit více koaxiálních kabelů (pro 4 kabely lze teoreticky získat šířku pásma 3 125 MB/s). CoaXPress je označováno jako rozhraní nové generace. Jeho úkolem je dosažení vysoké propustnosti dat bez omezení jako u Camera Linku. Velkou výhodou je nízká cena kabeláže (obyčejný koaxiální kabel) a její délka. Navíc propracovaný komunikační protokol umožňuje kameru synchronizovat s velmi nízkou latencí.

Dalším parametrem snímáčů je **rozsah detekovaného spektra**, protože jak již bylo zmíněno, používané snímáče zasahují do blízké UV oblasti (NUV) a blízké IR oblasti (NIR). Omezení se provádí pomocí filtrů na kameře a/nebo v/na objektivu.

Dalšími parametry je **barevná škála** (monochromatické nebo barevné kamery), rozsah expozičních časů, formát výstupních dat, možnosti řízení kamery (vstupy), závit objektivu, způsob upevnění kamery, napájení, odolnost vůči okolním vlivům (krytí, odolnost proti vibracím, odolnost proti mechanickému namáhání, rozsah teplot a vlhkosti okolí kamery při provozu, ...) a další (výrobce kamery a senzoru, ...), [3].

Průmyslové kamery jsou pomocí uvedeného rozhraní připojeny k **řídící jednotce**, nejčastěji k PC. Samotné získávání obrazu není většinou automatické po připojení kamery,

⁵ Standard GenICam definuje jednotné programovací rozhraní pro přístup k průmyslovým kamerám (či zařízení obecně), zejména pro jejich konfiguraci a snímání obrazu. Je nezávislé na přenosové technice (GigE Vision, Camera Link, USB, FireWire).

ale je třeba mít nainstalovány potřebné ovladače a základní software od výrobce kamery. Základní software často umí jen zobrazit kameru, ovládat její parametry, pořídit snímek, případně i záznam. Úprava, zpracování a analýza obrazu jsou již záležitostmi programování nebo parametrizace v uživatelsky přívětivém prostředí.

Místo PC může být použit kompaktní a odolný systém uzpůsobený pro průmyslové aplikace (Compact Vision System, CVS). Kompaktní systém je vlastně počítač optimalizovaný pro zpracování obrazu s minimalizací mechanických prvků, které významněji limitují užití klasických počítačů v průmyslové praxi. Takovéto systémy jsou pak snadno propojitelné a obsahují širší škálu nástrojů pro práci s pořízeným obrazem, která nevyžaduje znalost programovacích jazyků. Nutno je ovšem počítat s vyšší cenou.

Objektiv představuje systém optických elementů tzv. čoček a soustředí obraz na snímač. U převážné většiny objektivů pro spektrum VIS, NIR a NUV je možné pomocí kroužku na objektivu obraz zaostřit. Objektiv je pro uvedená spektra většinou z křemičitého skla upraveného pro využití v optice, tzv. optického skla. U běžného optického skla se často jedná o rozsah propouštěných vlnových délek elektromagnetického záření 300 až 2 700 nm (spektrální oblast je jen přibližná, velmi záleží na složení skla). U křemenného skla (sklo složené pouze z oxidu křemičitého [13]) je to 160 (160 nm jen několik procent, 170 nm je propustnost 50 %) až 3 600 nm s oknem nízké propustnosti v rozsahu 2 200 až 2 700 nm (vlivem silné absorpce vody). Existují dopovaná křemenná skla pro IR oblast, kde absorpce způsobená vodou je silně potlačena a rozsah rozšířen i přes 4 000 nm [24].

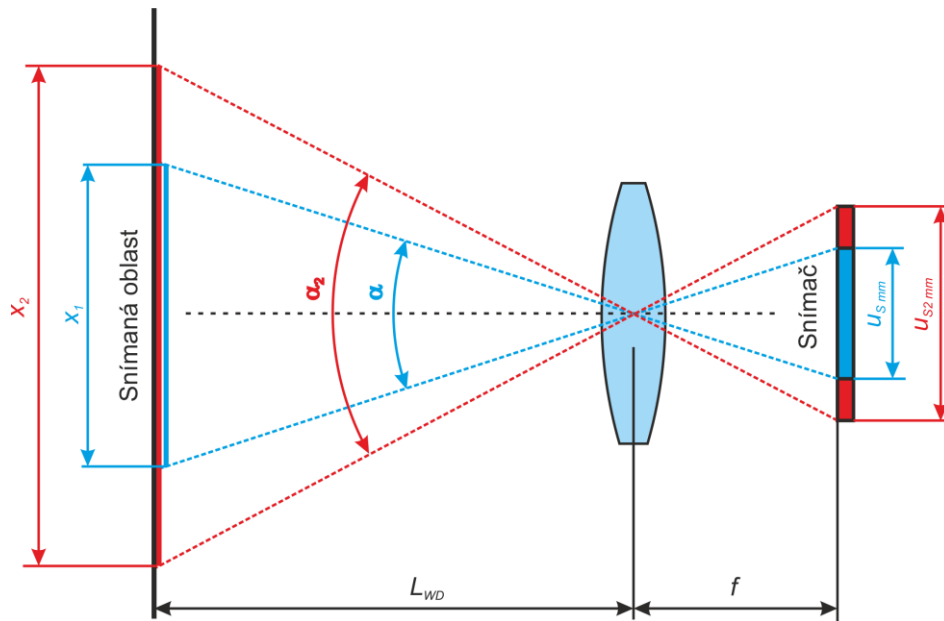
Hlavním parametrem je **ohnisková vzdálenost**, která určuje pro danou velikost čipu úhel záběru. Většina objektivů pro průmyslové aplikace má pevnou ohniskovou vzdálenost. Pro daný typ kamery s danou velikostí snímače je třeba určit objektiv, který bude mít vhodný úhel záběru, umožňující snímání celé scény z požadované vzdálenosti. Vychází se z velikosti oblasti zájmu, která je určena maximální velikostí předpokládaného snímaného objektu (bez nutnosti výměny objektivu). Oblast by měla být s rezervou nakonec větší, a to i s ohledem na pokles rozlišení a kontrastu objektivu směrem k okrajům. Vztah mezi velikostí oblasti zájmu (x_1 , [mm]), velikostí snímače ($u_{s\ mm}$, [mm]), pracovní vzdáleností kamery (L_{WD} , [mm]) a ohniskovou vzdáleností (f , [mm]) je zřejmý z Obr. 3.5. Matematicky je pak možno vyjádřit vztah z poměrů:

$$\frac{u_{s\ mm}}{x_1} = \frac{f}{L_{WD}} \quad (3.13)$$

Z uvedeného lze pak odvodit vztah pro ohniskovou vzdálenost [mm]:

$$f = L_{WD} \cdot \frac{u_{s\ mm}}{x_1} \quad (3.14)$$

Velikost snímače je uváděna v palcích, je tak třeba použít tabulku, která uvádí velikosti optických snímačů v mm (běžné jsou v Tab. 3.2).



Obr. 3.5 Vztah mezi zorným úhlem, ohniskovou vzdáleností a velikostí snímáče [3]

Vedle běžných objektivů se lze setkat i s dalšími typy objektivů. V experimentech v této práci byl použit např. telecentrický objektiv. Jedná se o složenou čočku, která má svou vstupní nebo výstupní pupilu nastavenou na nekonečno. V případě, že jde o vstupní pupilu, vytváří se pravoúhlý obraz předmětu. To znamená, že hlavní paprsky – šikmé paprsky, které procházejí středem aperturní clony – jsou rovnoběžné s optickou osou před nebo za systémem. Tyto objektivy zobrazují vždy stejnou velikost objektu (takzvaná paralelní projekce) a zaručují také zanedbatelnou deformaci obrazu ve směru od středu ke krajům. Rovněž se minimalizují zkreslení daná perspektivou (ztráta perspektivy). Zmíněnou čočkou, respektive clonkou umístěnou v jejím ohnisku, projdou pouze rovnoběžné paprsky. Clonka zajišťující telecentricitu má ovšem jako vedlejší efekt značný úbytek světelnosti. Důležité také je, že snímáný objekt musí být vždy menší než průměr objektivu.

V objektivěch bývá zabudována **mechanická clona**, která dovoluje regulovat množství světla procházející objektivem. Je to velmi důležitý nástroj pro ovlivnění expozice.

Expozice je pro získání obrazových dat obecným pojmem, který ovlivňuje kvalitu získaných dat u většiny použitých energií (kap. 3.1.6) k jejich získání. V této kapitole je pojem expozice vztažen k optickému záření. Vedle správného zaostření, nasvětlení scény, volby vhodného objektivu, snímáče a dalších faktorů, je třeba na snímáč přivést požadované množství světla a vzniklý signál správně zesílit. O tom rozhoduje expozice, která je závislá v optickém spektru elektromagnetického záření na třech hlavních faktorech: doba expozice (čas expozice, rychlost závěrky), clona a zisk (gain, kontrast, u komerčních fotoaparátů známé jako ISO), [3].

Doba expozice určuje, po jakou dobu je otevřena závěrka a snímáč je tak vystaven působení světla přicházejícího ze scény. Doba expozice T_E [s] je nastavitelná na hodnoty zaokrouhlené mocniny 2, kdy zvýšení doby o jednu hodnotu vede ke zdvojnásobení expozice (fotonů dopadajících na snímáč):

$$T_E \approx 2^{n_e} \approx \frac{1}{1\,000}, \frac{1}{500}, \frac{1}{250}, \frac{1}{125}, \frac{1}{60}, \frac{1}{30}, \frac{1}{15}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, \dots \quad (3.15)$$

kde n_e je parametr expozice a je celým kladným číslem. U průmyslových kamer je možné se setkat s použitím hodnot v milisekundách.

Clona je průměr otvoru, kterým prochází světlo, tedy je to fyzické omezení množství světla přicházejícího na snímač. Clona je většinou součástí objektivu, N_c je clonové číslo [-] a platí pro ně vztah:

$$N_c = \frac{f}{C} \quad (3.16)$$

kde f je ohnisková vzdálenost [mm] a C je průměr otvoru clony [mm]. Ze vztahu vyplývá závislost clonového čísla na průměru otvoru clony a ohniskové vzdálenosti. Je tím ovlivněno i množství dopadajícího světla procházející optikou kamery, tedy expozice. Při zdvojnásobení průměru clony se expozice (množství dopadajícího světla na snímač) zčtyřnásobí, neboť při zdvojnásobení průměru otvoru clony C se zčtyřnásobí plocha S , kterou prochází světlo ($S = \pi \cdot \frac{C^2}{4}$). Pro zdvojnásobení expozice je třeba zvýšit průměr clony o $\sqrt{2}$ ($\approx 1,4$). Vliv na snížení množství světla dopadajícího na senzor má také ohnisková vzdálenost. Při zdvojnásobení vzdálenosti klesne množství dopadajícího světla čtyřikrát. Je to dáno tím, že se světlo rozprostře na větší plochu. Clony mají clonová čísla velmi často v řadě, která respektuje výše uvedenou závislost, tedy při změně o jednu hodnotu výše se expozice (dopadající energie ve formě záření) sníží na polovinu:

$$N_c = \sqrt{2^{n_c}} = 1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; \dots \quad (3.17)$$

kde n_c je parametr clony a je celým kladným číslem. (Často je clona označována jako: f/1.0, f/5.6, f/8 atd.)

Zesílení signálu ze senzoru neboli **zisk** (anglicky označováno gain) ovlivňuje u snímačů přímo míru šumu. U fotoaparátů na kinofilmy se vyjadřuje jako *ISO* citlivost. V technické praxi nemá smysl normovat vlastní zesílení pro digitální snímače – kamery, protože citlivost senzorů na světlo je různá. Normalizace se provádí u fotoaparátů i průmyslových kamer, kde se normuje celková citlivost senzoru se zesilovačem. Citlivost se standardně udává v *ISO* jednotkách a měla by odpovídat citlivosti klasického kinofilmu. Každá sousední vyšší hodnota na *ISO* stupnici mění citlivost vždy právě dvakrát. Typická základní stupnice *ISO*[-], tedy je:

$$ISO = \dots, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, \dots \quad (3.18)$$

Pokud se zvýší zisk vyjádřený *ISO* stupnicí dvakrát (např. z *ISO* 100 na *ISO* 200), ke stejné expozici stačí poloviční energie vybuzená světlem (velice zjednodušeně řečeno stačí poloviční množství dopadajících fotonů).

Pomocí tří uvedených parametrů lze nastavovat expozici. Platí, že stejné expozice lze dosáhnout kombinací všech tří faktorů, ale nezíská se stejný obraz. Pro rychle se měnící scénu je nutné snímat v kratších časech. Pak je nutné otevřít clonu (nastavit malé clonové číslo) nebo více zesílit vystupující signál ze snímače. Otevřením clony se sníží hloubka ostrosti. Vzdálenější a bližší části scény od zaostřeného objektu jsou pak rozostřené, což může v některých případech úloh v průmyslové praxi být nežádoucí. Druhá možnost zesílit

vystupující signál zase zvyšuje relativní míru šumu v získaném snímku.

Vedle těchto tří faktorů lze ovlivnit expozici pomocí osvětlovačů (zdrojů záření dané vlnové délky nebo častěji v daném rozsahu vlnových délek). Vliv expozice včetně jejího ovlivnění pomocí tří parametrů a zdroje záření (osvětlení) je stejný pro celé optické záření. Je tak přenositelný i na IR a UV záření.

Osvětlení technologické scény a sledovaného objektu je další důležitou součástí hardware kamerového systému. Problematika je velmi náročná na řešení, protože neplatí jednoduchá pravidla a osvětlení pro daný typ technologické scény a sledovaného objektu nemusí být vhodné pro jiný. O volbě správného osvětlení rozhodují vlastnosti tří prvků zařízení pro strojové vidění:

- 1) Vlastnosti snímače (rozsah vlnových délek elektromagnetického záření, na kterou je citlivý, velikost snímače, možnosti zesílení signálu, ...).
- 2) Vlastnosti snímané scény, což je objekt a pozadí (odraz záření od povrchu pro dané vlnové délky, absorpce záření, emise záření, záření prošlé objektem, poloha snímaných objektů atd.).
- 3) Vlastnosti záření (intenzita osvětlení, pozice zdroje, vlnová délka emitujícího záření, míra difúze záření a směrovosti, ...).

U vlastností snímané scény je důležité respektovat, k jakým jevům dochází při dopadu optického záření dané vlnové délky do prostoru scény. U optického záření má elektromagnetické vlnění charakter vlnový a fotony nemají vysokou energii, kap. 3.1.5. Dochází tak mimo jiné k jevům jako je odraz a lom záření.

Při volbě osvětlení je třeba především znát:

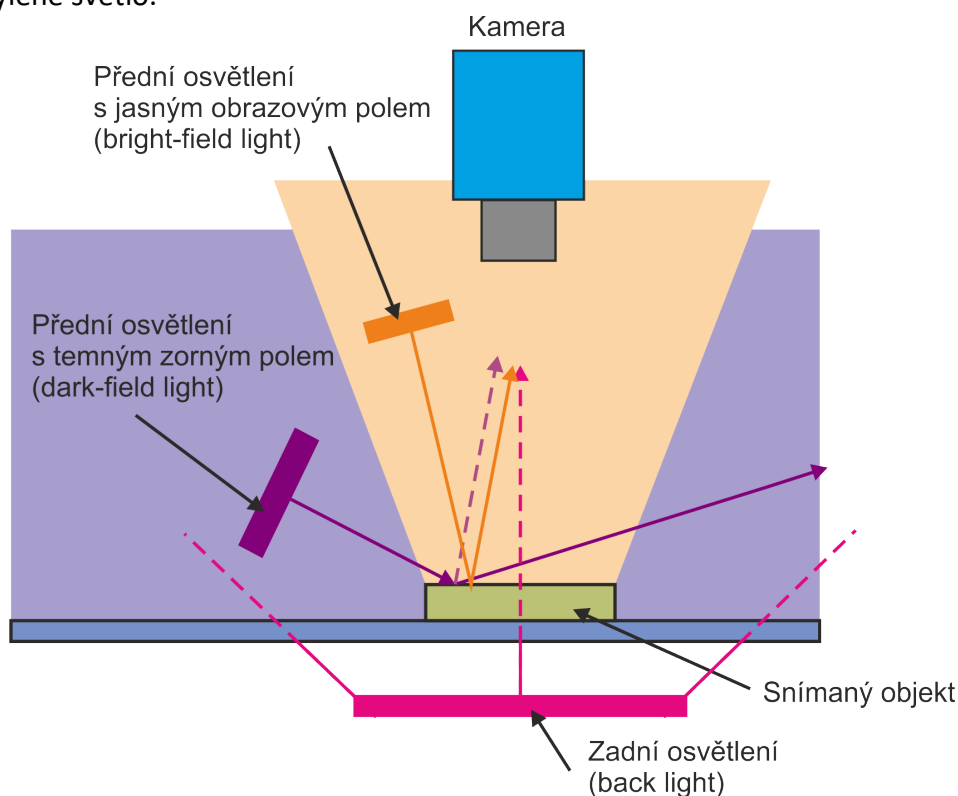
- jaká vlnová délka se bude od povrchu objektu odrážet, při dopadu se vždy část záření absorbuje, absorpce může být v celém snímaném spektru stejná, nebo větší v určitých vlnových délkách (u VIS se jedná pak o barvy objektů),
- kde mezi extrémními případy se nachází povrch sledovaného objektu a pozadí (dokonale zrcadlový a Lambertovský povrch, kap. 3.1.7.1), tedy zda odraz bude více zrcadlový nebo difúzní v daném sledovaném pásmu elektromagnetického záření,
- pokud je objekt transparentní, je důležité vědět, jaká vlnová délka je více absorbována, a která objektem prochází (což způsobí pokles intenzity procházejícího světla a případně i změnu barvy procházejícího záření ve VIS spektru), dále zda při průchodu záření dochází k rozptylu záření (např. vystupující světlo je více difúzní),
- zda objekt emituje záření ve spektru, na které je citlivý použitý snímač (např. roztavené sklo, tedy sklovina, emituje viditelné záření),
- v jaké poloze je sledovaný objekt a objekty pozadí vůči snímači a zdroji záření.

Správná volba typu osvětlení technologické scény dokáže nejen velmi zrychlit a zjednodušit následnou analýzu obrazu, ale také rozhodnout, zda je možné danou scénu vůbec snímat. Zvláště je-li scéna tvořena transparentními, lesklými nebo reliéfně nevýraznými objekty, je návrh osvětlení pro celkový úspěch klíčový.

Zdrojem záření může být například sluneční světlo, zářivka, žárovka, výbojka, ale u profesionálních průmyslových řešení se jako zdroj záření používají LED diody, laser atd. LED nepotřebují vysoké napětí a jejich světelný tok může být regulován. Vlastnosti záření těchto osvětlovačů se s časem mění jen málo a mají dlouhou životnost.

U LED zdrojů (i zdrojů na bázi zářivek a výbojek) lze rozdělit základní geometrii osvětlení podle (Obr. 3.6):

- 1) Přední osvětlení s jasným obrazovým polem (bright-field lighting) – světlo se od povrchu sledovaného objektu odráží do objektivu kamery. Využívá se ve spojení s rozptýleným světlem pro vytvoření kontrastů na základě rozdílné absorpce objektu a pozadí. Používá se i světlo směrové, ale mnohem méně, například pro vytvoření kontrastu lesklých ploch.
- 2) Přední osvětlení s tmným zorným polem (dark-field lighting) – světlo se odráží od struktury na povrchu sledovaného předmětu. Vytvoří se kontrastní obraz členitostí povrchu v tmném poli – z této vlastnosti je odvozen i název, používá se směrové světlo.
- 3) Zadní osvětlení (back lighting) – tzv. podsvětlení, osvětlení prochází kolem objektu (tvoří siluety) a v případě transparentního objektu prochází jím samým. Používá se k vytvoření obrazu obrysu objektu, typicky v úlohách měření rozměrů. Nutné je rovněž pro vytvoření kontrastního obrysu objektu za průhlednou lesklou překážkou. Nejčastěji se používá rozptýlené světlo.



Obr. 3.6 Základní geometrie osvětlení při návrhu strojového vidění

Samotné záření z osvětlovačů může být více rozptýlené (difúzní) nebo směrové až koncentrované. Obecně platí, že rozptýlené záření snižuje kontrasty způsobené členitostí objektu a strukturou povrchu a zvýrazní kontrasty způsobené absorpcí. Naopak, při snaze

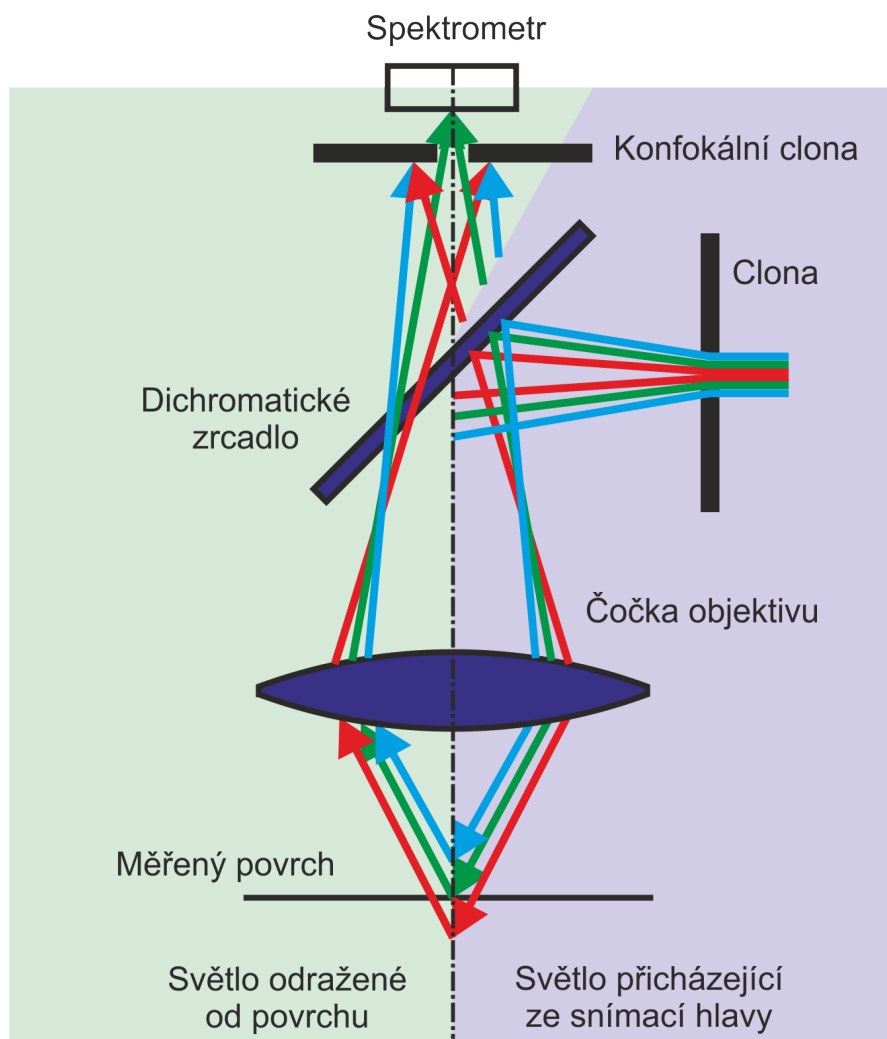
kontrastně zobrazit členění objektu, je voleno světlo směřové.

3.1.7.5 Konfokální chromatické snímače

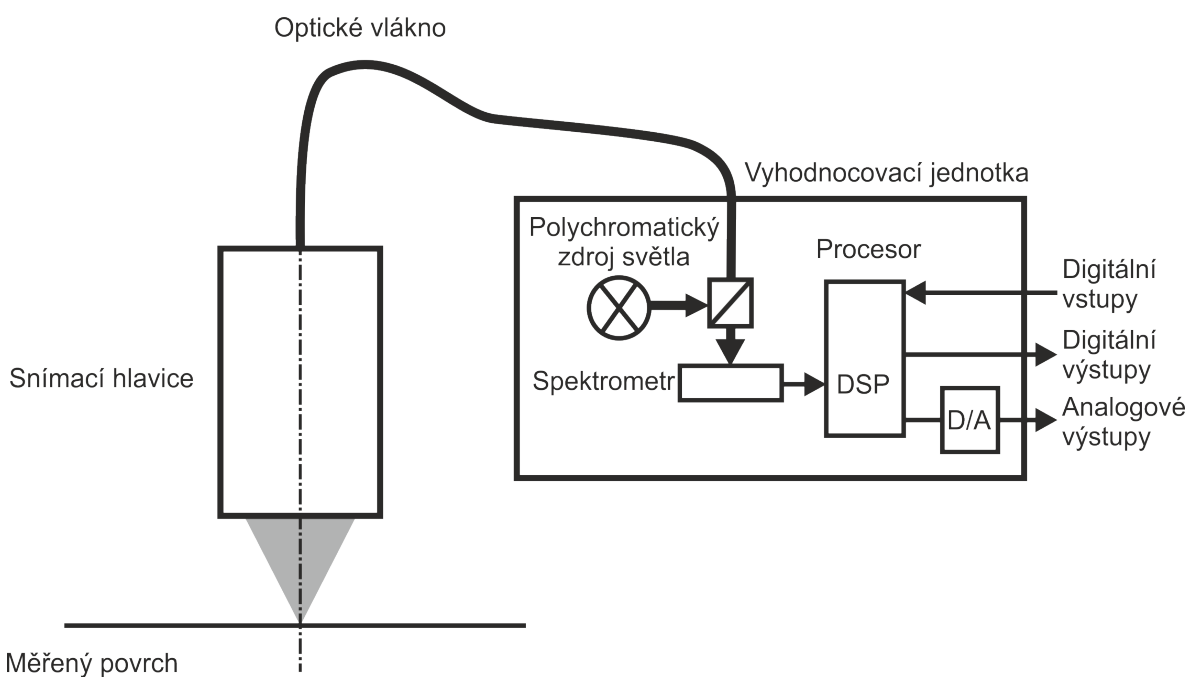
Ve VIS spektru pracují také konfokální chromatické snímače. Jedná se o bodové bezkontaktní senzory, které používají pokročilou optiku. V praxi se lze setkat i s pojmem konfokální mikroskopie. V případě konfokální mikroskopie se stejně jako u konfokálních snímačů jedná o optickou metodu, která provádí měření bodově. Pokud je realizováno měření v dalších bodech zájmu, může vzniknout dvojrozměrný obraz sledovaného objektu. Posun je zajištěn pomocí rastrování nebo rotujícím diskem. Pokud je zajištěna fokusace do více rovin (pomyslných řezů), lze získat i třírozměrný obraz. Oproti konfokálním snímačům používá konfokální mikroskopie laserového paprsku a jejím primárním cílem není skenování vzdálenosti vzorku, [25].

Konfokální snímače využívají bílého světla, které obsahuje všechny vlnové délky obsažené ve VIS spektru elektromagnetického záření. Bílé světlo je ve snímači rozloženo na jednotlivé vlnové délky – monochromatické složky, které jsou díky soustavě optiky zaostřeny na různé vzdálenosti, Obr. 3.7. (To je prováděno řízenou chromatickou aberací prostřednictvím chromatické odchylky.) Monochromatická složka, zaostřená právě na měřený povrch (tzv. fokální bod čočky), je reprezentována bodem a dává ostrý obraz, který se od povrchu odráží. Od povrchu se odráží i další složky rozloženého světla, ale odraz není ostrý. Světlo odražené od povrchu se pak vrací zpět přes systém optiky. Konfokální (bodová) clona zamezí průchodu neostrého odraženého světla, tedy světla z jiné než měřené roviny. Na elektrooptický detektor (spektrometr) pak dopadá pouze ostrý odraz od povrchu v dané vzdálenosti. Detektor vyhodnotí vlnovou délku a na základě jejího přepočtu v řídicí jednotce dojde ke stanovení vzdálenosti.

Samotný snímač je nejčastěji rozdělen na dvě části: snímací hlavici a vyhodnocovací jednotku, tzv. kontroler, Obr. 3.8. Tyto části jsou spojeny světlovodným vláknem. Vyhodnocovací jednotka generuje světelný paprsek a následně je v ní pomocí spektrometru vyhodnocena vlnová délka. V současné době se také začínají objevovat kompaktní systémy, vícebodové snímače a také liniové, více v kap. 6.5.1.



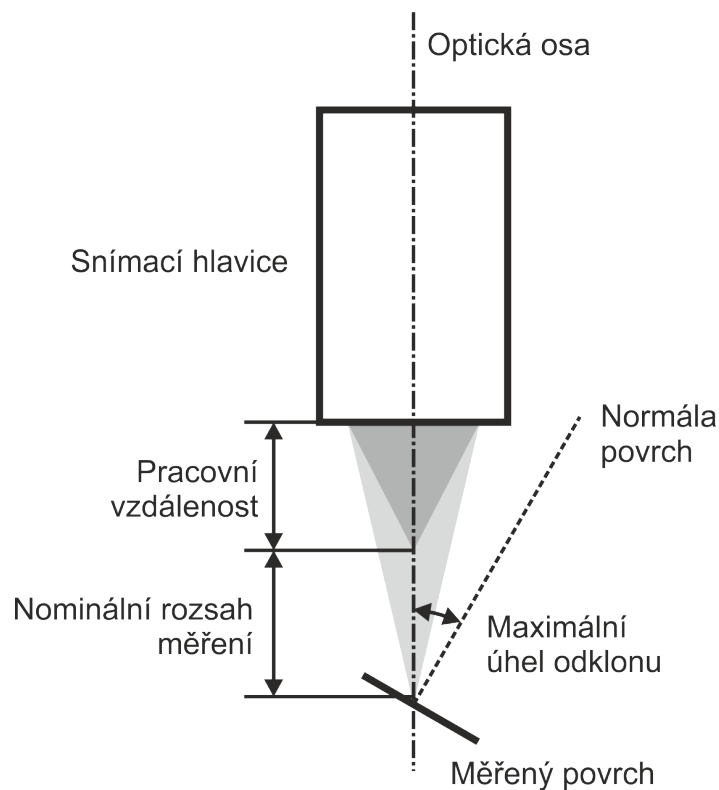
Obr. 3.7 Princip konfokálního snímače [25]



Obr. 3.8 Uspořádání konfokálního snímače [25]

U konfokálních snímačů jsou uváděny tyto parametry (Obr. 3.9):

- nominální rozsah měření snímací hlavičky je rozsah, který umožňuje snímací hlavičku měřit,
- maximální úhel odklonu je maximální úhel mezi optickou osou snímací hlavičky a normálou vzhledem k povrchu vzorku, pro který je měření ještě možné (ideálně by měla být pozice měření v normále vůči povrchu, ale výrobci udávají možné odchýlení), maximum se vztahuje k zrcadlovým povrchům, pro lambertovské povrchy je maximální úhel sklonu vyšší než uváděný, intenzita získaného signálu však klesá s rostoucím úhlem sklonu pro všechny typy vzorků,
- pracovní vzdálenost, je vzdálenost od hrany snímací hlavičky k místu počátku nominálního rozsahu měření,
- přesnost měření,
- průměr měřicího bodu,
- rychlost snímání vyhodnocovací jednotkou,
- interface vyhodnocovací jednotky pro zapojení např. PC,
- rozměry,
- a další.



Obr. 3.9 Některé důležité parametry snímací hlavičky

Konfokální snímače mají své nesporné výhody, mezi které patří:

- vysoká přesnost uváděná v řádu nm, pro větší rozsahy se přesnost snižuje, reálně pod jednotky μm , což pro většinu aplikací postačuje,
- nepatrný konstantní měřicí bod, který umožňuje měření velmi malých ploch,
- vysoce přesné měření na lesklých površích (zrcadlech) a na skle,
- jednostranné měření tloušťky transparentních materiálů (v případě dostatečné transparency materiálu a znalosti minimálně indexu lomu materiál/vzduch, ideálně i Abbého čísla),
- relativně vysoká rychlost vzorkování (běžné snímače mají frekvenci snímání do 25 kHz, špičkově do 70 kHz).

Vedle výhod existují také omezení použití konfokálních snímačů, což jsou především:

- maximální rozsah měření je v současné době do 42 mm [26], v případě měření tloušťky je možné se u běžného skla přiblížit s rozsahem až k 63 mm tloušťky skla,
- nižší je laterální rozlišení, které je u uvedených větších rozsahů v desítkách mikrometrů,
- přesnost snímačů je závislá na dodržení správné pozice snímací hlavičky vůči měřenému povrchu, ideálně by měla být pozice v normále vůči povrchu, ale výrobci udávají možný maximální odklon, u větších rozsahů je to jen $\pm 2,5^\circ$ (rozsah měření 42 mm), u menších rozsahů i $\pm 45^\circ$ (rozsah měření 1 mm),
- velké rozměry a hmotnost snímacích hlavic (s větším rozsahem měření rozměry narůstají),
- vysoká cena.

3.1.7.6 Snímače pro UV spektrum

Do optického záření spadá také UV záření, které je definováno v oblasti vlnových délek 10 až 390 nm (energie 3 až 124 eV) a je často děleno na:

- dlouhovlnné ultrafialové záření (315 až 390 nm, UVA),
- středovlnné (280 až 315 nm, UVB) a
- krátkovlnné (pod 280 nm, UVC).

Někdy je také používán pojem:

- blízké (300 až 390 nm, NUV),
- střední (200 až 300 nm, MUV),
- daleké (100 až 200 nm, FUV) a
- extrémní (pod 100 nm, EUV) [27].

Na zemský povrch dopadá záření UVA a částečně také UVB. Záření UVB a UVC jsou atmosférou pohlcována (UVC záření s plyny v atmosféře reaguje a je atmosférou úplně pohlcováno, na rozdíl od UVB záření).

Snímače pro UV spektrum používají často CCD technologii, a to i pro extrémní UV záření. Aplikace jsou díky pohlcení UVC záření známy především pro výzkum ve vesmíru. Příkladem je solární a heliosférická observatoř SOHO se zařízením EIT (Extreme ultraviolet

Imaging Telescope) pro detekci EUV [28]. Detektor EIT vychází z běžného snímače CCD (1 024 x 1 024 pixelů, 21,5 x 21,5 mm), který je speciálně ztenčený pro příjem fotonů EUV. Vzhledem k přibližně stejné citlivosti detektoru na spektrum EUV a VIS se používají speciální filtry. (Slunce je asi 10^9 krát jasnější ve VIS spektru než ve spektru EUV.) Filtry jsou ve formě extrémně tenké hliníkové fólie o tloušťce asi 200 nm (0,2 mikrometru) a přenášejí přibližně polovinu záření EUV, zatímco absorbují v podstatě veškeré VIS.

Používány jsou také senzory typu NMOS (N-type metal-oxide-semiconductor), což je negativní MOS (kov-oxid-polovodič). Vyráběny jsou technologií logických integrovaných obvodů, které pro realizaci logických členů používají unipolární tranzistory s indukovaným kanálem (v obohaceném režimu) typu N. Jednotlivé buňky NMOS senzorů jsou na rozdíl od CCD snímačů přímo čteny, podobně jako CMOS snímače. Tyto snímače mají vysokou citlivost na UV záření (nabízeny jsou se spektrální citlivostí od 200 do 1 000 nm [29]), široký dynamický rozsah v důsledku nízkého temného proudu a vysokého saturačního náboje, vynikající linearitu výstupu a nízkou spotřebu energie. Protože tyto senzory mohou hromadit velký náboj, jsou široce používány ve spektrofotometrii, kde jsou hladiny světla poměrně vysoké. Nevýhodou proti CCD snímačům je jejich nižší citlivost na záření, tedy nehodí se pro nízké intenzity detekovaného záření. NMOS snímač může být také ve tvaru řádkového čipu (liniového snímače) [29].

Pro průmyslové použití je využití extrémně krátkých vlnových délek optického záření problematické ze tří důvodů. Prvním je získání osvětlovačů, které budou emitovat záření v daných vlnových délkách s účinnou blokadou dalších vlnových délek, které jsou mimo potřebný rozsah. Druhým problémem je prokázaná škodlivost UV záření s vlnovou délkou nižší než 280 nm na zdraví. Třetím je extrémní cena zařízení s citlivostí na vlnové délky pod 180 nm, která jsou vyráběna pouze v kusech velmi často jen pro speciální vědecké účely. Pro využití v průmyslové praxi je tak vhodné výběr omezit na snímače pro záření s vlnovými délkami v rozsahu 180 až 390 nm, kde jsou technické možnosti pro úpravu běžných CCD snímačů. O možnostech využití snímačů pro dané vlnové délky rozhoduje použití materiálu na ochranná sklíčka snímače, čočky objektivu spolu s filtry. Běžná optická skla pohlcují UV záření s vlnovou délkou nižší než 300 nm, pro nižší vlnové délky se používá již křemenného skla, které absorbuje významně UV záření vlnových délek pod 180 nm, úplně pak absorbuje záření vlnových délek pod 160 nm. (Pro kratší vlnové délky lze použít materiálů na bázi fluoru jako je fluorid hořečnatý, který disponuje dostatečnou propustností do vlnové délky 120 nm). Problém se zdravotní závadností UV záření musí být ovšem náležitě řešen.

V průmyslové praxi jsou UV kamery využitelné pro detekci vad, znečištění povrchu (např. olej), úpravy povrchu, přítomnost vlhkosti. Také jsou v tomto spektru některé drobné částice lépe viditelné. Potenciálně zajímavé je využití UVB spektra pro detekci výrobků ze skla (využití spektrum 180 až 280 nm), kdy je UV záření většinou běžných skel již pohlcováno. Lze tak z UV kamery získat obraz neprůhledného výrobku, který je možné dále zpracovávat obrazovou analýzou s možností získání 3D modelu, kap. 6.1.3. Takovýto spolehlivý, dostatečně přesný a dostupný systém pro detekci tvaru a získání 3D modelu v současné době neexistuje. Lze se také zabývat možnostmi detekce vad ve výrobcích ze skla, např. kap. 6.2.5.5.

V současné době existující nabídka kamer s detekcí vlnových délek pod 300 nm není příliš široká. Příkladem může být kamera JAI CM-140 GE-UV se snímačem Sony ICX407BLA, rozlišením 1392 x 1040 pixelů (1,45 Mpx), velikostí snímáče $\frac{1}{2}$ " (6,4 x 4,8 mm), rychlostí snímání 16 fps, rozhraním GigE, datovou hloubkou snímáče 8 nebo 10 bitů, využitelným rozsahem vlnových délek je od 200 do 850 nm (spektrální odezva nad 20 %), [30]. Touto kamerou disponuje pracoviště autora této práce.

3.1.7.7 Snímače pro IR spektrum

IR má vcelku širokou oblast vlnových délek od 750 nm do 1 000 000 nm (1 mm), energie záření je 1,2 meV až 1,7 eV. Oblast je dělena na:

- blízké (750 až 1 400 nm, NIR),
- krátké (1 400 až 3 000 nm, SWIR),
- střední (3 000 až 8 000 nm, MWIR),
- dlouhé (8 000 až 15 000 nm, LWIR),
- vzdálené (15 000 až 1 000 000 nm, FIR).

V NIR již dnes běžně pracují dostupná zařízení. Důvodem je, že běžné snímače CCD a CMOS APS zasahují s citlivostí až za vlnové délky 1 000 nm, ale při vlnové délce 900 nm většina senzorů nezaznamená ani 10 % přicházejícího záření této vlnové délky. Nicméně, některé speciální senzory CMOS APS mohou dosahovat až 40 % zisku přicházejícího záření ve vlnových délkách 850 nm [31]. NIR je používáno např. v kamerách pro sledování dopravy, kde je třeba ve večerních, nočních a ranních hodinách řidiče neoslnit zářením ve VIS spektru. Dále pro aplikace v průmyslové praxi, např. pro sledování vad, povrchových úprav a nedostatků, které jsou snadněji identifikovatelné v infračervené oblasti. Dalším využitím je detekce čerstvosti ovoce a zeleniny, kdy je využívána spektroskopie v NIR oblasti. Omezené uplatnění NIR oblast také nalézá při kontrole solárních destiček elektroluminiscencí [32]. Pomocí IR filtrů lze odfiltrovat VIS záření a snímat pouze v oblasti NIR. V tomto případě je nutné počítat s užitím speciálně upravené optiky (s požadovanou charakteristikou), speciálním osvětlením a použitím potřebných filtrů.

Pro vlnovou délku nad 1 000 nm musí být již použito snímačů na bázi jiných materiálů nebo jiného provedení. Pro oblasti spektra IR záření jsou používány snímače dvou provedení (rozděleno podle interakce fotonů s materiálem senzorů):

- tepelné,
- kvantové [33].

Tepelné snímače jsou založeny na absorpci fotonů, které způsobí oteplení citlivé části detektoru a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo. Fungují tak na principu změny elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího IR záření. Snímače pak mohou být termoelektrické a pak se jedná o sériově řazené termoelektrické články, které jsou konstruovány jako tenké kovové pásy získané technologií tenkých vrstev [33]. Lze také využít pyroelektrického jevu pro pyroelektrické snímače, které jsou založeny na spontánní polarizaci při změně teploty. Měřeno je v obou případech napětí. Tyto postupy ovšem neumožňují získání dat v rastru a nejsou tak dále uvažovány pro získání obrazových dat.

Pokud je princip založen na změně elektrického odporu, pak jsou snímače nazývány bolometry. V tomto případě pohlcené záření způsobí změnu teploty odporového čidla a tím i změnu jeho elektrického proudu. Intenzita dopadajícího záření může být tedy určena ze změn odporu bolometru. Aby však byla změna teploty bolometru úměrná pouze absorbovanému IR záření, musí být vlastní bolometr tepelně izolován od svého okolí. Pro získání obrazových dat se používají tzv. mikrobolometry, které vytvářejí mikrobolometrické pole, což může být 2D rastr (plošný snímač) nebo 1D linie (řádkový snímač). Dnešní mikrobolometry jsou běžně složeny ze stovek tisíců bolometrů. Výhodou tohoto detektoru je, že detektivita není závislá na vlnové délce. Tento typ snímačů je používán pro běžné průmyslové aplikace, a to především z důvodu jeho nižší ceny a také tyto senzory nevyžadují chlazení pro svoji funkci, čímž se zjednodušuje jejich použití a také se snižuje jejich hmotnost.

Nejčastějšími používanými materiály senzorů detekujících IR záření v mikrobolometrech jsou amorfní křemík a oxid vanadičný. Byly také zkoumány i další materiály jako např. Ti, YBaCuO, GeSiO, poly SiGe a BiLaSrMnO, které se ovšem neosvědčily díky různým úskalím především při opakované výrobě.

Amorfní Si (a-Si) se dobře osvědčil, protože je vysoce stabilní a lze ho snadno integrovat do procesu výroby snímačů technologií CMOS. (Proces technologie CMOS vyžaduje, aby teplota zůstala v průměru pod 200°C, problém s některými dalšími potenciálními materiály spočívá v tom, že pro vytvoření požadovaných vlastností mohou být teploty depozice příliš vysoké.) Amorfní Si má také vynikající hodnoty koeficientu tepelného odporu (TRC)⁶ a nízký 1/f šum⁷.

Do procesu technologie CMOS mohou být také integrovány tenké filmy oxidu vanadia (VO_x), ačkoli se z teplotních důvodů nanášejí obtížněji než a-Si. VO_x byl používán pro starší technologie než a-Si, výkonost a životnost těchto senzorů je nižší.

Mikrobolometry jsou běžně využívány pro rozsah elektromagnetického záření 7 500 až 14 000 nm (7,5 až 14 μm), při teplotní citlivosti do cca 30 mK. Časová konstanta elementu je poměrně velká (kolem 12 ms). Na rozdíl od níže uvedených fotonových snímačů jsou mikrobolometry širokopásmové.

Kvantové snímače jsou založeny na principu vnějšího nebo vnitřního fotoefektu. V praxi se v současné době uplatňují především snímače polovodičové, tedy založené na vnitřním fotoefektu. Fungují tak na stejném principu jako výše uvedené snímače pro VIS a

⁶ Materiál použitý v detektoru musí vykazovat velké změny odporu během krátkých změn teploty. Protože se materiál zahřívá, vlivem příchozího infračerveného záření se odpor materiálu snižuje (záporný koeficient tepelného odporu). V současné době jsou vyráběny mikrobolometry, jejichž materiál dosahuje TCR blízkou - 2%/K. Ačkoli existuje mnoho materiálů, které mají mnohem vyšší koeficient TCR než a-Si, je několik dalších faktorů, které je nutné uvážit při průmyslové výrobě mikrobolometrů.

⁷ 1/f šum (také růžový šum) je signál, jehož výkonová frekvenční hustota je přímo úměrná převrácené hodnotě frekvence. Tedy při zdvojnásobení frekvence klesne energie o 3 dB. Jako jiné typy (barvy) šumu je třeba šum minimalizovat tak, aby výsledný signál byl šumem co nejméně ovlivněn a výsledný signál odpovídal skutečným hodnotám na měřeném objektu.

mohou být také založeny buď na fotovoltaičském nebo fotovodivostním principu. Fotovodivostní snímače mají v porovnání s fotovoltaičskými snímači obvykle vyšší citlivost a větší odstup signálu od šumu, ale je nutné je obvykle chladit na velmi nízké teploty. Proto jsou častěji používány snímače na fotovoltaičském principu.

Oproti bolometrům jsou kvantové snímače citlivější, ale mají schopnost detekovat záření pouze v úzkém rozsahu vlnových délek (snímače jsou úzkopásmové). Pásmo citlivosti je odlišné v závislosti na jejich typu:

- PtSi pro pásmo 3 600 až 5 000 nm,
- InSb pro pásmo 1 000 až 5 500 nm,
- QWIP (Quantum Infrared Photon Detector) založený na substrátu GaAs pro pásmo kolem 8 000 nm,
- HgCdZnTe pro pásmo 2 000 až 12 000 nm,
- InGaAs pro pásmo 900 až 1 700 nm,
- SiAs pro pásmo 5 000 až 28 000 nm.

Všechny uvedené typy jsou založeny na fotovoltaičském principu a mohou být řádkové nebo plošné a ve většině případů je nutné je aktivně chladit.

Následující tabulka podle [34] shrnuje základní odlišnosti mezi fotonovými a tepelnými snímači.

Tab. 3.3 Porovnání kvantových a tepelných snímačů, podle [34]

Vlastnost	Kvantový snímač	Tepelný snímač
Spektrální citlivost	Omezená	Široká
Citlivost	Vysoká	Nízká
Časová konstanta	Velmi krátká (cca μ s)	Střední (cca ms)
Nejčastější typ	PtSi a InSb, QWIP	Mikrobolometr
Pracovní teplota	Nízká (nutné chlazení)	Pokojová (lze chladit)
Cena	Vysoká	Nízká

Konstrukce termokamer je velmi podobná konstrukci kamery pro VIS a UV záření. Objektiv promítá dopadající IR záření na snímač, kde dochází ke změření jeho intenzity (jasu) v daném rozsahu vlnových délek. Tato data jsou následně digitalizována, filtrována a převedena ve výsledný snímek, který se odborně nazývá termogram.

Optika termokamer je v současné době vyráběna především z **germania** bez možnosti optického zoomu. Germanium bez antireflexní vrstvy má použitelnou spektrální propustnost od 1 800 do 18 000 nm [35]. Vzhledem k relativně vysoké odrazivosti germania (index lomu $n_{GRE} \sim 4$) je na povrchu čočky navíc nanесena antireflexní vrstva, která zabraňuje odrazu IR záření na povrchu čočky. Dochází tak ke zvýšení její propustnosti až na

90% a více. Čočka z germania navíc funguje jako filtr záření VIS a blízkému IR záření a také pomocí nanesených vrstev lze okno vlnových délek omezit.

U snímačů IR záření se jedná především o snímání emitovaného elektromagnetického záření (kap. 3.1.3), což je rozdíl oproti snímačům pro VIS, které detekují především odražené záření. Tato skutečnost není ovšem ovlivněna samotnými snímači, ale především emisí elektromagnetického záření samotnými snímanými objekty. Hodnoty, které daný IR snímač naměří, odpovídají souhrnu intenzity dopadajícího záření všech vlnových délek na snímač v daném rozsahu vlnových délek IR (termo-) kamery. Rozsah detekovaných vlnových délek je především ovlivněn rozsahem propuštěného záření optikou a citlivostí snímače.

Snímače pro IR záření jsou tak především používány pro měření teplot a hlavně teplotních polí, kdy intenzita záření dopadající na snímač je převedena na teplotu. Při použití 2D snímačů se pak mluví o termokamerách (IR kamerách).

Při měření teplot je velmi důležitá emisivita, což je parametr charakterizující povrch měřeného objektu. Emisivita ε je poměr mezi zářivým tokem povrchu objektu a zářivým tokem absolutně černého tělesa při stejné vlnové délce a teplotě. Emisivita je dále hodnota rovná hodnotě pohltivosti povrchu. Podle Stefan-Boltzmannova zákona pro vyzařování šedého tělesa udává emisivita povrchu tělesa jeho schopnost emitovat (vyzářit) tepelné záření při dané teplotě. Čím větší je emisivita, tím menší je vliv tzv. zdánlivé odražené teploty. V praxi je snazší měřit povrchy s velkou emisivitou, a proto je také snaha zvolit takový spektrální rozsah měřicího přístroje, ve kterém je emisivita co největší. Emisivita není pro daný povrch konstantní a je funkcí mnoha dalších parametrů, především teploty tělesa a vlnové délky záření, což je třeba při měření zohlednit.

U termokamer je v současnosti standardní přesnost „ ± 2 °C nebo ± 2 % z naměřené hodnoty, přičemž platí větší z obou hodnot.

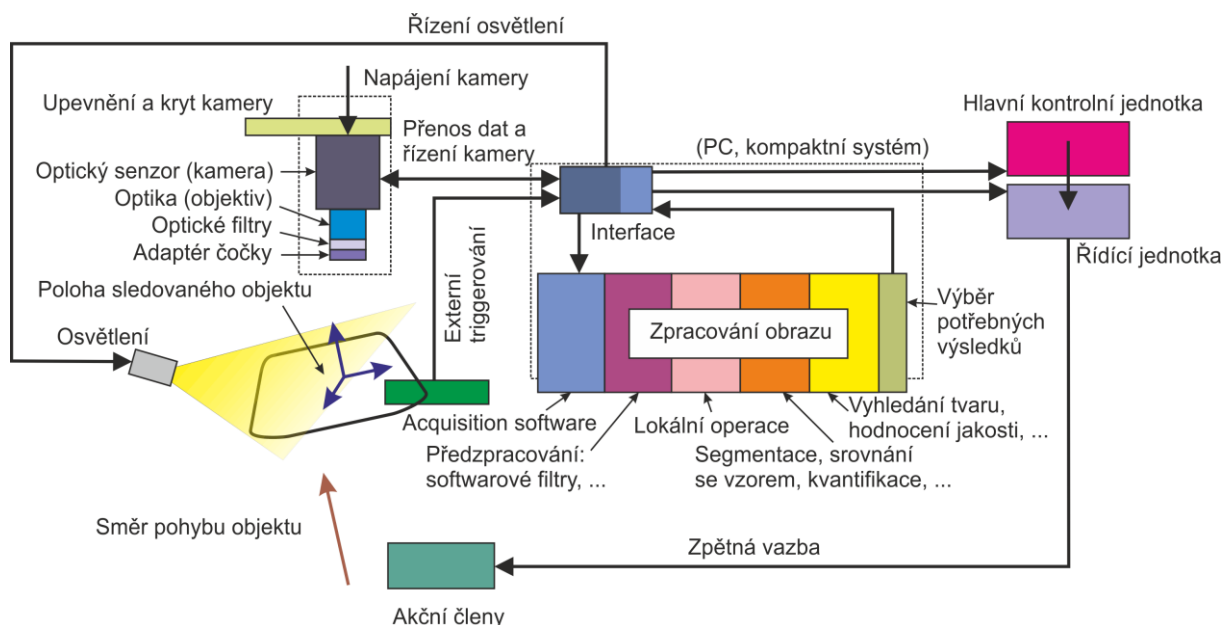
Obecně lze říci, že přístroje pro bezdotykové měření teploty jsou schopny měřit teplotu v rozmezí asi -40 až +3 500 °C. V celém tomto rozmezí je jeden přístroj schopen měřit jen výjimečně a nikdy v rámci jednoho svého měřicího rozsahu.

Plošné rozlišení termokamer je od 60 × 60 po 1 024 × 768 pixelů. Rychlost snímání (časové rozlišení) je u termokamer s tepelným detektorem běžně 9 až 60 Hz. Ve speciálním módu, tzv. windowing (termogram není pořizován v úplném rozlišení, ale ve sníženém), jsou některé termokamery s tepelným detektorem schopny zaznamenat snímky s frekvencí až 200 Hz. Speciální typy termokamer s kvantovými snímači mohou zaznamenat až tisíce snímků za sekundu [36]. Využití termokamer pro detekci vad a tvaru transparentních objektů je uvedeno v kap. 6.1.2.

Vedle kamer zaměřených na detekci teplotních polí existují také specializované kamery zaměřené na detekci plynů. Příkladem můžou být IR kamery firmy EyeCGas, které jsou specializovány na detekci plynů (od CO a CO₂ až po plynné uhlovodíky). Tyto kamery pracují s chlazeným kvantovým snímačem MCT (HgCdTe) s citlivostí v uváděném rozsahu 3 000 až 5 000 nm, [37].

3.1.7.8 Systémy pro získání a interpretaci obrazu pomocí optického záření

Výše uvedené snímače pro optické spektrum elektromagnetického záření jsou použity v kamerách, které jsou součástí komplexního systému pro získání obrazu. Základní schéma uspořádání jednotlivých (i doplňujících) prvků pro získání a následnou interpretaci obrazových dat je znázorněno na Obr. 3.10.



Obr. 3.10 Schéma systému pro získání a interpretaci obrazových dat [3]

K dosažení potřebné kvality obrazových dat a na základě interpretace získání potřebných informací je nutné splnit mnoho podmínek, které se navzájem ovlivňují. Specifickými požadavky pro aplikaci v průmyslové praxi jsou především tyto:

- osvětlení musí být vhodné pro snímání daného materiálu, v některých případech je nutné zvolit správnou kombinaci několika typů osvětlovačů;
- poloha sledovaného objektu musí být přizpůsobena osvětlení a pozici kamery anebo osvětlení a kamera musí být přizpůsobena poloze objektu;
- adaptéry čoček mohou být použity místo (nebo spolu) s osvětlením pro lepší zobrazení objektu (adaptér polarizovaného osvětlení, souosé kolmé osvětlení, adaptér difúzního osvětlení,...);
- filtry mohou být užity pro separaci určité vlnové délky ze snímané scény nebo polarizaci;
- optika (objektiv) včetně clony;
- optický snímač včetně potřebné elektroniky (kamera) zvolený podle vlastností sledovaného objektu a jeho pohybu (řádková nebo plošná kamera), požadovaného rozlišení (plošné, časové, spektrální, ...) a dalších parametrů;
- upevnění kamery a případně její kryt, včetně izolace od nežádoucích vibrací, prachu, nízké nebo vysoké teploty okolí;
- požadované napájení kamery (podle výrobce a typu kamery);
- přenos dat do zařízení pro zpracování obrazu (kabely, A/D převodník) a řízení

- kamery;
- j) volitelné zařízení a kabely pro spouštění (triggerování) kamery;
- k) interface podle typu zvolené kamery (USB, Camera Link, GigE Vision,...);
- l) acquisition software (software pro získávání snímků z kamery);
- m) zpracování obrazu, které musí být spolehlivé, výsledky musí být získány včas a ve vhodné formě, kap. 4.
- n) výběr potřebných výsledků;
- o) přenos dat do hlavní vyhodnocovací jednotky a (nebo) řídicí jednotky (rozšířená o zpětné vazby na akční členy).

Kroky k až n jsou prováděny ve vyhodnocovací jednotce, což může být klasický počítač, ale i kompaktní a odolný systém, tzv. CVS (Compact Vision System), [3].

3.1.8 Rentgenové záření

Rentgenové záření (ang. X-rays) má vlnovou délku v rozsahu 0,01 nm (10 pm) až 10 nm (čemuž odpovídá energie 100 eV až 100 keV, [16]). Elektromagnetické záření vlnové délky větší než 0,1 nm je nazýváno měkké rentgenové záření, záření vlnové délky kratší než 0,1 nm je nazýváno tvrdé.

Rentgenové záření patří mezi ionizující (elektromagnetická) záření, kam dále patří záření gama (elektromagnetické záření, kap. 3.1.9), alfa (korpukulární záření, tedy proud částic – jader helia), beta (záření urychlených elektronů – beta mínus nebo pozitronů – beta plus), neutronové záření (proud volných neutronů) a další méně obvyklé proudy volných částic (protonové, těžších iontů, ...). Kvanta ionizující záření mají natolik vysokou energii, že jsou schopna přímo nebo nepřímo uvolňovat elektrony z atomového obalu a tím látku ionizovat. Působení ionizujícího záření tak poškozuje organickou tkáň a může způsobit mutace, rakovinu, nemoc z ozáření i smrt. Použití rentgenového záření představuje zdravotní riziko a zvyšuje tak vysoké nároky na bezpečnost zařízení. Na druhou stranu představuje využití rentgenového záření velký potenciál pro medicínu, ale také pro průmysl. Z ionizujícího záření je rentgenové záření nejvíce rozšířeno při využití v praxi.

Vzhledem k vlnové délce a energii částečně proniká rentgenové záření i neprůhlednými objekty pro VIS. Princip získání obrazových dat je v tomto případě převážně založen na rozdílné míře absorpce elektromagnetického záření různými materiály a jejich různou tloušťkou (kap. 3.1.2). Prochází-li toto záření látkou, je látkou pohlcováno a jeho energie se mění ve vnitřní energii látky. Pohlcování záření značně závisí na protonovém čísle chemického prvku, kterým je látka tvořena. Čím vyšší protonové číslo prvek má, tím více záření pohlcuje [38]. Rentgenová obrazová data vznikají projekcí rentgenového záření z ohniska anody, přes struktury uvnitř objektu s různými absorpčními koeficienty a různými tloušťkami, na film, folii či zobrazovací detektor. Různým absorpcím rentgenového záření v různých objektech jsou na obraze přiřazovány různé intenzity ve stupnici šedi. Vzniká tak projekční stínový obraz denzitní (zobrazujícím rozdíly v hustotě materiálu). Obraz odpovídá velikosti, tvaru a uspořádání uvnitř sledovaného objektu. V případě medicínských aplikací se jedná nejčastěji o tělo vyšetřovaného pacienta, kde tkáň a orgány v organismu jsou

reprezentovány různou úrovní šedi, která odpovídá různé intenzitě tělem prošlého rentgenového záření (nejvíce je pohlcováno rentgenové záření kostmi, méně měkkými tkáněmi, nejméně tělními dutinami a vzduchem) [15]. V případě aplikací v průmyslu se jedná nejčastěji o využití při defektoskopii, která je používána pro nedestruktivní kontrolu materiálů a hotových výrobků. Každá vnitřní vada znamená zeslabení nebo změnu struktury prozařovaného materiálu, která změní absorpci rentgenového záření.

Především pro průmyslové aplikace se vžil pojem radiografie, kterému odpovídá termín skiografie používaný ve zdravotnictví. Jedná se o statické pozorování objektu a získání rentgenového snímku. Pro dynamické sledování objektu v průmyslu, resp. pacienta ve zdravotnictví se používá pojem radioskopie, resp. skiaskopie. Jedná se tak o sledování obrazových dat v reálném čase.

Podle způsobu vzniku rentgenového záření je rozlišováno:

- 1) Brzdné záření – vzniká jako důsledek zpomalování pohybu elektronů, které dopadají velkou rychlostí na povrch kovu. Změna rychlosti elektronů, brzdění jejich pohybu vzájemným působením s atomy kovu, má za následek vyzařování elektromagnetických vln, jejichž frekvence se spojitě mění. Proto je spektrum brzdného záření spojitě.
- 2) Charakteristické záření – souvisí se změnami energie atomů kovu, které ji získaly působením dopadajících elektronů. Toto spektrum je diskrétní, tzv. čárové (ve spektru se vyskytují pouze spektrální čáry).

Reálná zařízení emitují oba typy rentgenového záření.

Rentgenový přístroj (rentgen) se skládá ze zdroje záření, zdroje vysokého napětí, stojanu a zobrazovacího zařízení. Zdrojem záření je rentgenka, jejíž základní části jsou katoda (obvykle žhavená), která emituje elektrony, a anoda zhotovená z wolframu. Mezi katodou a anodou je velký potenciálový rozdíl (10 kV až 400 kV), takže se emitované elektrony pohybují se značným zrychlením. Následně pak velkou rychlostí dopadají na plochu anody a z jejího povrchu je emitováno brzdné rentgenové záření, ale jen poměrně malá část (pouze okolo 1 %) původní kinetické energie dopadající částice se mění na záření. Většina energie se mnohonásobným Coulombovským rozptylem nakonec přenáší na kinetickou energii atomů látky anody – mění se na teplo. Anoda se tak silně zahřívá a je třeba ji za provozu chladit – vodou, otáčením anody,... [38].

Většina vzniklého záření je emitována téměř izotropně, tedy do všech směrů stejně. V převážné většině aplikací je však potřeba záření cíleně směřovat do požadovaného místa. Záření směřující do jiných směrů může být nežádoucí, rušivé či dokonce škodlivé a nebezpečné. Toto směřování neboli kolimace záření je prováděno pomocí tzv. kolimátorů. Kolimátor je takové mechanické a geometrické uspořádání materiálů absorbujících daný druh záření, které propouští jen záření z určitých požadovaných směrů (úhlů), zatímco záření z jiných směrů absorbuje a nepropouští [15].

Na anodě vzniká vedle požadovaného tvrdého rentgenového záření celé spektrum elektromagnetického záření od měkkého, přes UV až po VIS. Převážná část VIS a UV záření a částečně měkkého rentgenového záření, jsou pohlcovány materiálem, ze kterého je vyrobena anoda, dále skleněnou baňkou rentgenky, chladicím olejem, materiálem krytu a

výstupního okénka. Měkká část spektra rentgenového záření je pro běžnou diagnostiku nepoužitelná (u pacientů se absorbuje většinou již v kůži a měkkých vrstvách tkáně, podobně jako u kovových materiálů při průmyslových aplikacích detekce). Proto je měkké rentgenové záření odstraňováno pomocí filtrace, kdy se do cesty záření vkládá hliníková nebo měděná destička tloušťky 1,5 až 4 mm. Nicméně, měkké elektromagnetické záření je využíváno hlavně v oblasti medicíny, například jako rentgeny ve stomatologii. Výhodou tohoto záření je nízká pronikavost v materiálech, jeho přesné dávkování a jemné rozlišení detailů v diagnostikovaném materiálu – tkáni.

Generované, směřované a filtrované rentgenové záření prochází sledovaným objektem a dopadá na citlivou vrstvu nebo detektor. V současné době digitální radiografie prakticky již vytlačila rentgenové filmy jak ve zdravotnictví, tak v průmyslu a používají se především polovodičové detektory a paměťové folie. V minulosti se především pro skiaskopii používal také zesilovač obrazu.

Polovodičové snímáče (ploché snímáče s digitálním výstupem) jsou nejčastěji používány u radioskopických systémů zaměřených na rentgenovou tomografii (kap. 4.4.12). Ta umožňuje získání 3D obrazu sledovaného objektu. Polovodičové snímáče v současné době představují dva základní systémy, a to s přímou a nepřímou konverzí rentgenového záření [15].

Nepřímá konverze, systémy na bázi amorfního silicia fungují na principu, kdy záření vyvolá světelné záblesky ve vrstvě scintilačního snímáče⁸ např. na bázi jodidu cestného. Světelné záblesky jsou pak snímány fotodiodami většinou na bázi CCD snímáče.

Přímá konverze, systémy na bázi amorfního selenu digitalizují signál bez nutnosti scintilačních snímáčů nebo fluorescenčních materiálů. Záření vyvolá náboje ve fotovodivém materiálu – amorfní selen (a-Se). Vysoké napětí 1 kV až 5 kV urychlí náboje, které jsou snímány transistorovým polem TFT (Thin Film Transistors), implantovaných technologií integrovaných obvodů v tenké vrstvě na skleněném nosiči. Snímání, tzv. read-out, probíhá v multiplexním režimu v obou na sebe kolmých osách snímáče u a v – poskytuje **souřadnicové impulsy** o poloze místa detekce fotonu rentgenového záření ve flat-panelu. Tyto souřadnicové impulsy jsou analogově-digitálním převodníkem převedeny do digitální formy. Snímáče s přímou konverzí mají menší dynamiku než nepřímé. Dynamikou se rozumí citlivost v široké oblasti energií, ve výsledku zčernání. Rozlišovací schopnost obrazů závisí pouze na hustotě obrazových elementů (pixelů) na flat panelu.

Paměťové fosforové folie jsou v současné době používány především pro systémy digitální skiografie. Paměťové folie se používají obdobně jako rentgenové filmy. Speciální folie se vloží do kazety a při dopadu rentgenového nebo gama záření jsou vybuzeny elektrony v krystalické struktuře folie a posouvají se do vyšších energetických vrstev, kde zůstávají v kvazistabilním stavu. Ve speciálním scanneru se pomocí laserového svazku tyto

⁸ Scintilační snímáč (detektor) je zařízení pro detekci ionizujícího záření založené na principu excitace elektronu do vyššího energetického stavu zářením, přičemž návrat elektronu do základního stavu se projeví jako světelný záblesk.

elektrony uvolňují a ve fluorescenční vrstvě vznikne viditelný obraz. Snímek je pak sejmut a digitalizován. Paměťové folie mají velkou dynamiku, což je zvláště vhodné při prozařování materiálů o různých tloušťkách (absorpce). Životnost folie je prakticky nekonečná, dochází však k mechanickému poškození manipulací s foliemi, což v praxi znamená možnost použít jednu folii až 1 000×. Folie se zakládají do kazet buď ručně nebo se používají speciální čtečky, kde je možné vložit folii i s kazetou. Folie se automaticky vyjme, je přečtena, následně vymazána a vrácena zpět do kazety.

Možnosti využití rentgenového záření pro detekci výrobků ze skla jsou popsány v kap. 6.1.4 a výsledky využití pro získání 3D obrazových dat jsou uvedeny v kap. 6.2.5.6.

3.1.9 Gama záření

Záření gama (γ) je definováno jako záření o vlnové délce převážně kratší než 0,01 nm (10pm, odpovídá energii 100 keV). Nicméně tato hranice horní vlnové délky není pevná. Záření gama může mít i delší vlnové délky než je 0,01 nm a tím se bude překrývat s oblastí tvrdého rentgenového záření. Záření se pak rozlišuje i podle svého zdroje, přičemž se samo záření jinak fyzikálně neliší. Fotony rentgenového záření vznikají při interakcích vysoce energetického elektronu, ovšem fotony gama záření vznikají při procesech uvnitř jádra atomu [16]. Výjimkou z definice gama záření je vysoce energické záření pocházející z vesmíru, kdy stejně je označováno i záření, které není důsledkem radioaktivní přeměny.

Záření gama se řadí mezi ionizující záření, vzniká při procesech uvnitř jádra atomu a často vzniká spolu s alfa (α) či beta (β) zářením při radioaktivní přeměně jader. Když jádro vyzáří částici α nebo β , nové jádro může být v excitovaném stavu. Přejít do základního stavu je spojen s vyzářením fotonů záření gama.

Záření γ se využívá v tzv. radioisotopových stopovacích neboli indikátorových metodách, které slouží ke sledování skrytého pohybu a distribuci hmoty uvnitř fyzikálních, chemických či biologických soustav nebo v různých technologických zařízeních. Do soustavy je vpravena vhodná „značená“ látka s navázaným radionuklidem (tzv. radioindikátor), jehož pohyb a chování v systému se pak sleduje na základě detekce ionizujícího záření, emitovaného při radioaktivních přeměnách jader v radioindikátoru. Pohyb a distribuci radioindikátoru lze sledovat odběrem vzorků z vhodných míst a změřením vhodným detektorem [15]. Lze také využít plošných snímačů s pravidelným rastrem měřících buněk, které zajistí získání obrazových dat (nazývané jako gamakamery nebo scintilační kamery). Tato metoda je nejvíce rozšířena v nukleární medicíně, ale využívá se také v biologických a technických aplikacích.

Pacientovi se aplikuje malé množství vhodné γ -radioaktivní látky, tzv. radiondikátoru či radiofarmaka, která jsou specifická pro jednotlivé orgány a druhy vyšetření. Většinou se podává intravenózně (podání látky přímo do žíly), někdy perorálně (přes ústa) či inhalačně. Látka vstoupí do metabolismu organismu a distribuuje se v něm podle svého chemického složení, fyziologicky či patologicky se hromadí v určitých orgánech a jejich částech a následně se vylučuje či přeskupuje. Z míst depozice radioindikátoru vychází záření γ , které díky své

pronikavosti prochází tkání ven z organismu. Pomocí scintilační kamery se zjišťuje distribuce radiondikátoru v jednotlivých orgánech a strukturách uvnitř těl. Tato metoda se nazývá scintigrafie či gamagrafie a umožňuje získávat informace nejen anatomické, ale hlavně o orgánových funkcích a metabolismu. Matematickým vyhodnocením získaných dat lze získat křivky časového průběhu distribuce radioindikátoru a vypočítat dynamické parametry charakterizující funkci příslušných orgánů [15].

Scintilační kameru tvoří plošný scintilační krystal, ke kterému je přiložena matice fotonásobičů. Na druhé straně, ze které přichází gama záření od pacienta, je umístěna olověná deska s provrtanými otvory, která zajišťuje kolimační projekci na krystal. Jsou-li otvory dostatečně dlouhé (řádově desítky mm), mohou jimi projít pouze fotony pohybující se (s určitou tolerancí) ve směru osy otvorů (průměr řádově v mm). Scintilační krystal je uzavřen v olověném a světlotěsném krytu. Za krystalem je poté světlo-vodivý materiál, který se spojuje s mnoha fotonásobiči. Každá scintilace z krystalu osvítlí všechny fotonásobiče, nicméně intenzita osvětlení těchto fotonásobičů závisí na poloze scintilace. Impulzy všech fotonásobičů se poté převádějí do odporové matrice, což je systém odporů, který funguje jako filtr přivedených impulzů. Vytřídí vždy dva největší impulzy pro obě osy snímače u a v . Tyto impulzy jsou pak zvýrazněny vychylovacími destičkami osciloskopu, kdy se na obrazovce objeví světelný bod. Tento světelný bod odpovídá místu scintilace v krystalu. Scintilace se mohou zobrazit buď na obrazovce osciloskopu, dají se zvýraznit na fotografický materiál nebo ukládat do elektronického zařízení.

3.1.10 Pásmo radiových vln

Pásmo radiových vln je charakterizováno vlnovou délkou elektromagnetického záření v rozsahu 1 mm až 100 km. Navazuje tak na vzdálené IR záření. Radiové vlny jsou především používány ke komunikaci (modulace amplitudy nebo frekvence). Nicméně, využití pro získání obrazových dat je možné najít v astronomii. Zdrojem vnějších radiových vln je Slunce, dále (podstatně slabšími zdroji) je střed naší galaxie, rádiové záření dalších hvězd, mlhovin, zbytků supernov, planetárních mlhovin, obřích molekulových oblaků, galaxií a kvazarů.

Pro získání dat se používá často rádiový teleskop, který zjišťuje především tyto vlastnosti rádiových zdrojů: hustotu toku (v jednotkovém frekvenčním intervalu), polohu zdroje na nebeské sféře (tzv. rádiová astrometrie), jeho úhlovou velikost, spektrum, polarizaci, popř. strukturu a jednotlivé podrobnosti a časové změny těchto vlastností. Obrazová data jsou ale většinou získána z bodového měření teleskopu. Díky otáčení naší planety nebo natáčení samotného teleskopu je získáváno více bodových měření, která jsou následně počítačově zpracovávána a upravena.

V současné době je často využíváno radiové interferometrie, která používá radiové teleskopy ve formacích. Obrazová data jsou pak získána z Fourierovy transformace a následné úpravy obrázků [39].

Radiových vln se používá také při magnetické rezonanci k dodání vhodné energie s frekvencí, která odpovídá rezonanční frekvenci precitujícího protonu. Protony tak s

elektromagnetickým impulsem na dané frekvenci rezonují (odtud název "magnetická rezonance"). Tato frekvence je v pásmu radiových vln, kap. 3.7.

3.2 Záření částic

V kap. 3.1.8 bylo zmíněno ionizující záření částic alfa, beta, neutronové záření a další. Detekce a spektrometrie záření alfa a beta je obtížnější než u záření gama, neboť toto záření je málo pronikavé, snadno se absorbuje a obtížně vniká do citlivého prostoru snímače. Získání obrazových dat je tak vcelku komplikované, i když lze použít principiálně podobných zařízení jako pro detekci záření gama.

V praxi se mnohem více používá elektronového záření, které je především využíváno v elektronovém mikroskopu. Mezi optickým a elektronovým mikroskopem je podobnost. Fotony jsou u elektronového mikroskopu nahrazeny elektrony a skleněné čočky jsou nahrazeny elektromagnetickými čočkami (v podstatě cívka, která vytváří vhodně tvarované magnetické pole).

Jedním ze základních parametrů všech mikroskopů je jejich mezní rozlišovací schopnost, která je úměrná vlnové délce použitého záření. U současných optických mikroskopů je uváděna mezní rozlišovací schopnost na hranici 200 nm. Elektrony mají podstatně kratší vlnovou délku, než má viditelné světlo. Elektron s dostatečně vysokou energií má vlnovou délku srovnatelnou až s velikostí atomu ($\sim 0,01$ až $0,001$ nm). Rozlišovací mez elektronových mikroskopů závisí na použitém urychlujícím napětí, čím je vyšší, tím je vyšší rozlišení. V současné době je možné se dostat na mezní rozlišení elektronového mikroskopu konstrukce TEM na $0,1$ nm [40].

Na rozdíl od ionizujícího beta záření, nevzniká záření elektronů radioaktivním rozpadem, ale vzniká na katodě. Zdrojem elektronových paprsků je elektronová tryska, která se skládá nejčastěji z wolframového vlákna, fokusační elektrody a anody. Elektrony emitované vláknem jsou urychlovány polem anody a soustředěny v úzký svazek. Tento paprsek se dále zaměřuje kondensorem na pozorovaný objekt, umístěný ve speciálním držáku blízko ohniska objektivu. Rychlost elektronů je až $0,7c$ (rychlosti světla) a při konstrukci čoček se tak musí počítat i s relativistickými efekty. Elektronové paprsky přicházejí po průchodu předmětem, ve kterém nastává rozptyl elektronů, do objektivu, který vytvoří první zvětšený obraz předmětu blíže ohniskové roviny projekční čočky. Kontrast obrazu je podmíněn různým rozptylem elektronů v různých bodech předmětu. Zvětšení u elektronového mikroskopu závisí na ohniskové délce objektivu a na jeho vzdálenosti od roviny obrazu. První obraz se obvykle pozoruje na pomocném stínítku, umístěném blíže ohniskové roviny projekční čočky. Ve středu stínítka je otvor, který vymezuje část prvního obrazu, jenž se promítá projekční čočkou na hlavní stínítko. První obraz se zvětší projekční čočkou ještě několikrát. Celkové zvětšení je pak rovno součinu zvětšení objektivu a projekční čočky.

Elektronové mikroskopy se v současné době používají ve dvou základních provedeních, které se liší konstrukcí a využitím interakce elektronů se sledovaným objektem:

Transmisní elektronový mikroskop (TEM), který využívá zobrazení vnitřní struktury objektu (vzorku) pomocí prošlých elektronů (TE). Používá se k prohlížení velmi tenkých řezů tkání, do tloušťky 100 nm, při vysokém zvětšení a s velkou rozlišovací schopností až 0,1 nm pro fyzikální a technické aplikace (zvětšení až 1 000 000 krát). U biologických objektů je reálně dosažitelná rozlišovací schopnost vždy nižší, přibližně 2 nm [41]. V současné době se vyrábějí speciálně upravené TEM mikroskopy HRTEM (High-resolution transmission electron microscopy), které mají rozlišovací schopnost až 0,05 nm (zvětšení až 50 000 000 krát) a je možné jimi studovat materiály na atomární úrovni [42].

Urychlovací napětí elektronů je u TEM 100 až 400 kV. Ke zviditelnění prošlých elektronů vzorkem a zobrazovacím systémem pro přímé pozorování operátorem se používá fosforové stínítko pokryté nejčastěji sulfidem zinečnatým (ZnS), který je schopen v závislosti na energii a množství dopadajících elektronů emitovat světlo s vlnovou délkou 450 nm. Systém pro zaznamenání obrazu pak může být řešen speciálním fotografickým materiálem nebo pomocí scintilačního snímače AYG (Yttrium Aluminium Garnet) spojeného s CCD snímačem.

Rastrovací elektronový mikroskop (SEM), který využívá zobrazení povrchu nejrůznějších objektů nejčastěji pomocí sekundárních elektronů (SE) a/nebo zpětně odražených elektronů (BSE). Tento typ elektronového mikroskopu lze považovat za analogii světelného mikroskopu (dochází ale také ve větší míře k tvorbě sekundárních elektronů, které jsou také zaznamenávány do výsledného signálu). Oproti optickému mikroskopu je výhodou velká hloubka ostroty a také možnost získat další data, ze kterých je možné získat interpretaci další informace. Při interakci urychlených elektronů s hmotou objektu totiž vzniká ještě celá řada projevů, jako je rentgenové záření, Augerovy elektrony⁹, katodoluminiscence. Například lze získat prvkové složení preparátu a při porovnání s vhodným standardem lze určit i kvantitativní zastoupení jednotlivých prvků [40]. Rastrovací elektronové mikroskopy dosahují rozlišovací schopnost přibližně 10 až 20 nm, zvětšují v rozmezí 20 až 50 000 krát a zvětšení je plynule nastavitelné.

K zobrazení povrchu objektu se používají sekundární elektrony. Vzhledem k nízké energii sekundárních elektronů se z vyvýšenin na povrchu objektu dostane do detektoru více sekundárních elektronů a výsledkem je vyšší intenzita signálu z detektoru, která se projeví jako světlé místo na obrazovce. Z prohlubní povrchu se do detektoru dostane méně signálu, tedy projeví se jako tmavší místo na obrazovce. Tím je získán topografický kontrast, který umožňuje zobrazit v mnohonásobném zvětšení povrch objektu.

Produkce odražených elektronů závisí na středním atomovém čísle povrchu objektu. Jako světlé oblasti se budou na obrazovce jevit místa s vyšším středním atomovým číslem (tvořeny těžšími prvky), oblasti tvořené lehkými prvky se budou jevit jako tmavá místa, což

⁹ Augerův jev (Augerův efekt) je ve fyzice označení jevu, při kterém dochází k vyražení elektronu z atomu, které je způsobené přechodem jiného elektronu ve vnitřních vrstvách elektronového obalu.

umožňuje prvkovou analýzu.

Princip SEM spočívá v rozpohybování paprsku primárních elektronů (zkoncentrovaného elektromagnetickými čočkami) před dopadem na povrch objektu pomocí vychylovacích cívek tak, že pokryje řádky (rastruje) malou plošku. Počet řádků je možné měnit od desítek do několika tisíc a zároveň lze měnit i rychlost přeběhu paprsku v jednom řádku. Detektor sekundárních elektronů je tvořen scintilátorem, který po dopadu elektronů uvolní záblesk světla (550 až 650 nm), jehož intenzita je přímo úměrná energii elektronů, které ho vyvolaly. Světlo je dále vedeno světlovodem a komoru SEM opustí průchodem křemenným okénkem. Mimo vakuum je umístěn fotonásobič, který zachytí světelný signál a převede ho na elektrický, přičemž dojde k zesílení signálu zhruba 1 000 až 1 000 000 krát [40].

Příprava objektu (vzorku) spočívá v tom, že se pokryje tenkou vrstvou těžkého kovu a poté se po něm přejíždí (řádkuje) svazkem elektronů. Urychlovací napětí elektronů je nejčastěji 0,1 až 30 kV. SEM se využívají pro zobrazení a analýzu povrchů téměř libovolně velkých vzorků (je-li dostatečně velká vakuová komora pro jejich umístění).

Elektronové mikroskopy se využívají v mnoha oblastech jako např. v materiálovém výzkumu nebo v biologických aplikacích. Mohou poskytnout komplexní informaci o mikrostruktuře, chemickém složení a o mnoha dalších vlastnostech zkoumaného vzorku. Získaná data jsou rastrována a jsou tak daty obrazovými. Příklad využití SEM pro získání obrazových dat a jejich následné zpracování je uveden v kap. 5.3.2 a kap. 5.3.4.

3.3 Atomární síly

Mikroskopie atomárních sil (AFM z anglického Atomic Force Microscopy) je metoda, která umožňuje trojrozměrné mikroskopické zobrazení povrchů. Metoda je založena na sestavení obrazu bod po bodu při vysokém rozlišení, které umožňuje zobrazit i periodickou strukturu atomové mřížky [43].

Princip je založen na detekci ohybu velmi ostrého zkoumacího hrotu, upevněného na ohebném nosníku – raménku (tzv. cantilever), při průchodu nad vzorkem. Běžná raménka jsou dlouhá od 100 do 200 μm , široká jsou od 10 do 40 μm a jejich tloušťka bývá od 0,3 do 2 μm .

Existuje několik režimů snímání povrchu. Dříve byly používány kontaktní metody, kdy se sledovalo prohnutí nosníku. Nekontaktní režim je založen na pohybu hrotu ve vzdálenosti, kde působí přitažlivé síly (především Van der Waalsova a elektrostatická síla, detekovat lze i další síly). V praxi se používá zpětná vazba, což je režim s konstantním ohnutím, ve kterém se v každém bodě rastru porovná současná hodnota ohnutí s přednastavenou hodnotou. Pokud se hodnota liší, nosník s hrotem se přiblíží nebo oddálí od vzorku o takovou vzdálenost v ose z , aby se hodnota ohnutí opět shodovala s přednastavenou hodnotou. Místo velikosti ohnutí se pak k sestavení obrazu použijí hodnoty vzdálenosti v ose z . Dnes jsou častěji používány bezkontaktní metody.

Protože jsou síly mezi snímacím hrotem a povrchem vzorku velmi malé, provozuje se bezkontaktní režim tak, že je nosník rozkmitáván a místo jeho ohnutí se měří velikost amplitudy. Protože velikost amplitudy závisí na vzdálenosti mezi hrotem a vzorkem, lze sledováním změn amplitudy sestavit obraz povrchu vzorku. Tomuto typu mikroskopu se říká FM–AFM mikroskop (Frequency Modulated AFM). Pružné raménko je rozkmitáno harmonickou silou na vlastní frekvenci raménka a jeho vyšších harmonických frekvencích. Měření je fázový posuv kmitání způsobený atomárními silami. Přesnost AFM je podmíněna přesností udržování polohy hrotu, přesností jeho pohybu a schopností detekce ohnutí. Pro pohybování hrotem se používají výhradně piezoelektrické skenery, které jsou schopny realizovat pohyby menší než desetina nanometru. Aby bylo možno udržet přesnou polohu hrotu, staví se mikroskopy AFM mechanicky velmi pevné a bývají umístěny na antivibračních stolech.

Detekce ohnutí nosníku se provádí nejčastěji pomocí laseru. Laserový svazek z laserové diody se nechá dopadat na nosník, od něho se odráží podle zákona odrazu a dopadá na fotodetektor. Změní-li se ohnutí nosníku, změní se i úhel dopadu svazku na nosník a proto svazek dopadne do jiného místa fotodetektoru. Bude-li fotodetektor citlivý na místo dopadu svazku, může se z jeho výstupu určit ohnutí nosníku.

Rozlišení je závislé na poloměru křivosti špičky hrotu (cca. 5 nm), velikosti obrazu (1 x 1 μm , 512 x 512 měřících bodů). V tomto případě bude rozlišení 2 nm. Zvětšením snímané plochy dochází k poklesu rozlišení. Obecně lze využít rozlišení stovky mikrometrů až nanometry [43].

3.4 Zvukové (mechanické) vlnění

Zvukové vlnění je mechanické vlnění v látkovém prostředí. Pro získání obrazových dat je využíván především ultrazvuk, což jsou mechanické kmity o frekvenci vyšší, než je frekvenční mez slyšitelnosti lidského ucha, tj. vyšší než 20 kHz.

Obecně, pro diagnostiku v technice i lékařství, se používají přístroje pracující s frekvencí 2 až 40 MHz [44], v technické praxi 1 až 10 MHz podle [45] a 0,1 až 15 MHz podle [46].

Vznik a šíření ultrazvukových vln prostředím je umožněno existencí vazebných sil mezi částicemi látky. Šíření ultrazvukového vlnění je možné dvěma způsoby: podélně (částice kmitají ve směru šíření vlnění) nebo příčně (pohyb částic se děje kolmo na směr šíření). U tekutin (plynných a kapalných látek) závisí rychlost šíření na tlaku a hustotě prostředí. V tekutinách jsou malé mezimolekulární vazby a tak se těmito typy prostředí šíří pouze podélné vlny, protože proti nim nevzniká smykové napětí (dochází ke střídavým změnám tlaku okolního prostředí). Zhušťování a zředňování částic v tekutinách probíhá bez výměny tepla. U pevných látek jsou mezimolekulární vazby mnohem vyšší, proto kromě změny tlaku dochází také ke smykovému napětí [44]. Z toho plyne, že se pevnou látkou šíří vlny podélně i příčně. Při aplikaci v lékařství se tak ultrazvuk šíří v měkkých tkáních a tekutinách lidského

těla formou vlnění podélného, v kostech se ultrazvuk šíří též formou vlnění příčného.

Každé prostředí, ať živé či neživé, je z akustického hlediska charakterizováno několika parametry. Nejdůležitějšími z nich jsou:

- rychlost šíření ultrazvuku daným prostředím,
- akustická impedance,
- útlum,
- odraz a
- lom.

Množství akustické energie odražené na akustickém rozhraní je funkcí rozdílu akustických impedancí objektů (např. tkání nebo vad), tvořících toto rozhraní. Diagnostická informace je získána zachycením, zpracováním a zobrazením ultrazvukových signálů, odražených od rozhraní, případně prošlých.

Ultrazvukové vlnění je získáno například periodickým nabíjením destičky vhodného materiálu (např. křemene, syntetické látky), kdy nastává elektrostrikce (opačný piezoelektrický jev), což znamená, že vlivem elektrického napětí se materiál smršťuje a rozpíná (deformuje). Tím vzniká mechanické vlnění. Zdrojem ultrazvukových kmitů pro diagnostické účely jsou převážně elektricky buzené piezoelektrické měniče. Ty jsou zároveň i snímačem, který převádí odražený nebo prošlý signál zpět na elektrické napětí.

Nejjednodušším typem ultrazvukového obrazu je **jednorozměrné zobrazení A**, charakterizované sledem výchylek časové základny osciloskopu. Poloha výchylky odpovídá místu odrazu, její amplituda množství odražené akustické energie (označení A je z anglického Amplitude: odrazy modulují amplitudu výchylek). Tento typ zobrazení je dosud používán v oftalmologii (očním lékařství).

Dvojměrné zobrazení, označované jako zobrazení **B** (z anglického slova Brightness – jas: zachycené odrazy modulují jas stopy na obrazovce). U původního, tzv. statického zobrazení B, vznikal obraz velmi pomalu ručním posunem a nakláněním sondy, tvořené jediným měničem. V současné době se výhradně využívá zobrazení **B dynamického typu** s rychlým způsobem snímání a širokou stupnicí šedi (128 až 256 stupňů šedi). Jeho podstatou je vytvoření postupné série obrazů vyšetřované oblasti, umožňující její souvislé přehlédnutí včetně možnosti sledování pohybu. Někdy se dynamické systémy označují jako systémy pracující v reálném čase. Obecně lze říci, že dynamické B-zobrazení tvoří základ ultrazvukové diagnostiky tím, že poskytuje základní morfologické informace, tj. informace o odrazivosti jednotlivých objektů (např. tkáňových struktur vyšetřované oblasti).

Dále existuje **C-mód**, kterým lze zaznamenat plošný řez vyšetřovanou oblastí v určité hloubce. Existuje také **D-mód**, který využívá Dopplerova jevu a umožňuje měření rychlosti pohybu pohyblivých struktur. V neposlední řadě je používán také **M-mód**, který je jednorozměrným dynamickým zobrazením zkoumané oblasti v čase (slouží k vyšetření pohybu anatomických struktur, zejména srdce). Naměřená echa jsou pak zakódována do stupňů šedi a zobrazena pod sebou podle času.

Zpracováním obrazu lze také získat **3D zobrazení** (případně 4D včetně času). Sonda se

během snímání buď lineárně posunuje, naklání nebo rotuje. Údaje o odrazivosti v jednotlivých rovinách jsou zaváděny do paměti počítače, který provede matematickou rekonstrukci obrazu. Technologie rekonstrukce obrazu je obdobná jako u jiných moderních tomografických metod.

Analogovou část přístroje (sondu) tvoří nejčastěji detekční systém sdružující vysílač i přijímač v jednom, tj. zajišťuje vznik ultrazvukového signálu elektrickým buzením piezoelektrického měniče, zachycení jeho odrazu a přeměnu v elektrický signál. Při průchodové metodě se používají dvě stejné sondy, jedna je vysílačem, druhá přijímačem. Následuje analogově digitální převodník, který převede elektrický signál na digitální data, která jsou zpracována a zobrazena. Zobrazení do rastrovaného obrazu je umožněno díky využití počítačů, ale počítač umožňuje také naprogramovat optimální podmínky pro jednotlivá vyšetření (pre-processing) a také dodatečně upravovat zachycený obraz (post-processing) [44].

V technických a lékařských aplikacích je třeba zajistit průchod ultrazvukových vln mezi ultrazvukovou sondou a povrchem objektu použitím vhodné přechodové látky (voda, olej, vazelína), aby se odstranila vzduchová vrstva, která brání vytvoření dokonalé akustické vazby.

Použití ultrazvuku má široké uplatnění v technice i lékařství:

- a) Zobrazování ultrazvukem (ultrasonografie).
- b) Echolokace (sonary, živočichové).
- c) Průzkum a mapování oceánů (měření hloubek).
- d) Nedestruktivní kontrola výrobků a materiálů.

Existují dvě metody zjišťování vad v materiálu pomocí ultrazvuku. Jedná se o průchodovou a odrazovou metodu. U průchodové metody jsou nejčastěji použity dvě stejné sondy, umístěné proti sobě. Nachází-li se uvnitř zkoumaného materiálu objekt (např. vada), část vln se od jejího povrchu odrazí a tím za objektem vznikne stín. Tato metoda nedokáže určit přesnou polohu v hloubce objektu, ale pouze procentuálně vyčísluje jeho velikost. Tento princip měření je vhodný pro zkoušení materiálů menších tloušťek. U odrazové metody je použita pouze jedna sonda, na rozhraní mezi materiálem a vadou dochází k odrazu. Odražené impulzy detekované sondou zařízení vyhodnotí a určí přesnou vzdálenost místa odrazu. Technické využití je možné nelézt i v praxi, kap. 6.1.5 a kap. 6.2.5.7.

Pro technické účely je používán také ultrazvuk k odměřování vzdálenosti. Tyto bodové snímače vzdálenosti jsou založeny na principu time-of-flight, tedy na měření času za který se vyslaný signál vrátí zpět do vysílače. Jako vysílače a přijímače ultrazvuku se nejčastěji používají piezoelektrické, méně často magnetostrikční, měniče. Piezoelektrický měnič se využívá v první fázi jako vysílač ultrazvukových impulzů a v druhé fázi pak jako detektor přijímané odražené ultrazvukové vlny. Pracuje se s ultrazvukem s frekvencí od 20 do 60 kHz.

Ultrazvukový vysílač je na krátkou dobu vybuzen kmitočtem, ideálně jen po dobu několika pulzů tohoto kmitočtu. Vzniklý ultrazvukový pulz se následně odráží od všech předmětů v okolí, které mají hustotu větší než vzduch, a jako část emitovaných pulzů se vrací zpět do přijímače. Čas, který uplyne mezi vysláním a příjmem, lze snadno převést na

vzdálenost s pomocí známé rychlosti šíření zvuku v daném prostředí. Rychlost šíření zvukových vln ve vzduchu se liší v závislosti na teplotě prostředí, tlaku, vlhkosti či nadmořské výšce. Při pokojové teplotě (20 °C) může být jako výchozí hodnota používána konstanta 343 m.s⁻¹ [47].

U těchto typů snímačů je upřednostňován kolmý kontakt s povrchem, kdy impulzy nejsou vychýleny a putují zpět, přímo k přijímači. Pokud se úhel dopadu na povrch zvětší, sníží se podíl energie pulzů odražených zpět do přijímače. Při dosažení limitní hodnoty úhlu, již signál není zachycen. Pro mechanické vlnění platí stejné zákony odrazu a lomu jako pro elektromagnetické záření.

Ultrazvukové snímače jsou vhodné i pro snímání vzdálenosti od objektů z transparentních nebo lesklých materiálů, kap. 6.7.1.5. Pokud budou bodové snímače umístěné do rastru, je možné získávat obrazová data. Problémem může být detekovatelný odraz ultrazvukových pulzů a nutnost, aby povrch nebyl příliš odkloněn od normály měření.

3.5 Elektrická energie

Existuje dále celá škála „bodových“ kontaktních i bezkontaktních snímačů využívajících elektrického nebo magnetického pole. Do této skupiny patří snímače odporové, indukční, kapacitní a s vířivými proudy (lze zařadit i magnetické). Snímače je možné umístit do matice a teoreticky získat rastrovaná obrazová data. Snímače ale musí měřit skutečně bodově, bez vzájemného ovlivnění a měly by přinášet spojitou informaci o vzdálenosti snímače od objektu v určitém rozsahu. Tyto bodové snímače mohou ale také najít uplatnění u trendů zmíněné senzorové fúze (multisenzoriky), kdy na základě dat z bodových snímačů může být rozšířená informace např. o další dimenzi, kap. 6.7.1.5.

Metoda, která umožňuje přímo získání 2D obrazu je elektrická impedanční tomografie (Electric Impedance Tomography – EIT). Jedná se o zobrazovací metodu, která ukazuje konduktivitu prostředí, tedy schopnost prostředí vést elektrický proud. Metoda je založena na různých elektrických vlastnostech objektu (např. v tkáních v případě těla pacienta) [44].

Princip je založen na elektrické impedanci¹⁰. Pro lékařské účely se používají střídavé proudy o velikosti 0,1 až 1 mA a o frekvenci 0,01 až 1 MHz (průběh proudového impulsu je většinou sinusový). Elektroimpedanční měřicí systémy jsou tvořené zdrojem elektrického proudu, vysílacími a měřicími elektrodami, zesilovačem signálu a obvody pro zpracování signálu. Po obvodu sledovaného objektu je rozmístěná rovnoměrná síť elektrod. Ty jsou využívány jako zdroj střídavého elektrického proudu, tak jako snímače elektrického napětí.

¹⁰ Elektrická impedance popisuje odpor látky proti průchodu a určuje fázový posun (časové zpoždění) mezi elektrickým napětím a proudem. Jedná se o vektor definující poměr mezi elektrickým napětím a proudem, jednotkou je Ohm. Jedná se o komplexní veličinu (složená z reálné a imaginární složky).

Obvykle dvě elektrody jsou v daný okamžik vysílací a ostatní jsou elektrodami měřícími. Elektrody jsou různě přepínány podle dané metody, kterých je více (Neighbouring, Opposite, Cross a Adaptive) [48]. Působením elektrických proudů protékajících objektem dochází uvnitř objektu k rozložení potenciálu, které je ovlivněno elektrickými vlastnostmi vnitřních struktur objektu. Hladiny se stejnou velikostí potenciálu (tzv. izopotencionální hladiny) jsou vždy kolmé na směr šíření elektrických proudů v objektu. Rozložení izopotencionálních hladin uvnitř objektu vytváří na povrchu objektu tzv. napěťové profily, které jsou detekovány měřícími elektrodami. Změny elektrických vlastností uvnitř objektu ovlivňují rozložení potenciálu a vyvolávají změny napěťových profilů povrchu objektu [44].

Rozšíření a kvalita výsledného obrazu rostou s počtem měřících elektrod (obvykle od 16 do 256) a jsou podmíněny provedením mnoha měření (stovky až tisíce) pro různá rozložení potenciálu uvnitř a na povrchu objektu. Ze získaných sad napětí odlišných pro každou distribuci potenciálu lze rekonstruovat výsledný obraz.

Vedle statického zobrazení umožňuje metoda také sledování dynamické změny elektrických vlastností v čase nebo vytvoření trojrozměrného obrazu. Metoda je jednoduchá, bezpečná a levná, ale za cenu nízké rozlišovací schopnosti, neostrých částí uvnitř objektu, výpočtové náročnosti a četných obrazových artefaktů.

Rozšíření EIT je především v lékařství, např. monitorování a vyšetření plic, vyšetření prsu, mozku, Vzhledem k předpokládanému minimálnímu vlivu metody na pacienta je vedle lékařské diagnostiky a klinického vyšetření metoda používána i pro kontinuální sledování funkcí pacienta. V technických oborech je EIT používána pro nedestruktivní testování materiálů, detekci trhlin a koroze, zobrazení toku kapalin a plynů v potrubí (např. ucpání potrubí). Dále je využívána v geofyzice pro materiálové složení půdy pod povrchem, detekci úniku tekutin a průtoků a také v dalších přírodních vědách. Potenciální využití je možné najít také u skloviny, kap. 6.1.6.

3.6 Kontaktní (mechanické) metody

Mezi kontaktní mechanické metody lze zahrnout taktilní snímače, využití proudění tekutin, měřicí souřadnicové stroje a další.

Taktilní snímače jsou prvky, které jsou schopné snímat dotyk s objektem vnějšího prostředí a převádět ho na elektrický signál. Snímače mohou být seskupeny do matice a pak jsou získávána rastrováná (obrazová) data. Taktilní snímače mohou být založeny na několika fyzikálních principech a pak se dělí na zařízení [49]:

- *s použitím elastomeru* (nejčastěji sycená pryž grafitem nebo železným prachem), elastomer mění svůj elektrický odpor v závislosti na působící síle, lze spojitě měřit velikost tlaku (v procentech), je však obtížný převod na absolutní hodnotu tlaku, mohou být také řešeny maticově, např. 16 400 (128×128) senzorů o rozměrech $2,5 \times 2,5$ mm na ploše 500×500 mm, 1 000 fps, rozlišení 8 bitů (256 úrovní

zatížení) [50],

- s *tenzometry*, což jsou většinou jen samostatné („bodové“) snímače, používány jsou drátěné, foliové a polovodičové snímače,
- *kapacitní*, která nejčastěji využívají změn společných ploch elektrod, deskových nebo častěji ve tvaru souosých válců, mezi elektrody je vložen pružný člen,
- s *piezoelektrickými materiály*, které využívají piezoelektrický jev, jsou konstrukčně velmi jednoduché, malé, ale mají velký vnitřní odpor, jsou vhodné pro snímání dynamických sil (vibrací),
- s optickými vlákny, v nichž vnější vlivy modulují procházející světlo (nejčastěji jeho amplitudu, dále také fázi, polarizaci nebo spektrální vlastnosti), zdrojem světla je laser, laserová dioda nebo LED, používá se nejčastěji změny amplitudy vyvolané např. mikroohybem, změnou vzájemné optické vazby, změnou tlumení, změnou přechodu a odrazu světla.

Užití taktilních snímačů je široké, od detekce objektu „hmatem“, přes hmatové úchopné senzory, náhrady částí těla až po bezpečnostní a naváděcí prvky. Pokud má senzor maticové uspořádání, pak lze získat rastrovaná obrazová data. Lze tak využít některé z taktilních snímačů, a to s použitím elastomeru a s optickými vlákny. U optických vláken lze použít senzory s mikroohybem vlákna, který je složen z vláken uspořádaných napříč a při jejich ohybu klesá intenzita světla šířícího se jádrem optického vlákna.

Souřadnicové měřicí stroje (SMS, Coordinate Measuring Machines) jsou v současné době jedním z nejrozšířenějších zařízení v oblasti měření ve strojírenství. Princip souřadnicového měření spočívá ve stanovení základního bodu v prostoru. Polohy dalších bodů na měřeném objektu jsou měřeny formou souřadnicových rozměrů v osách x , y , z . Měřicí snímací hlavy jsou převážně dotykové, ale mohou být také nahrazeny hlavami optickými případně i jinými. Mechanické snímací hlavice jsou v podstatě pevné měřicí doteky, nejběžnější jsou tvaru kulového, kuželového nebo talířového. Pevný dotek se používá jednak ve směru osy snímače, jednak ve směru kolmém k ose snímače [51].

SMS jsou určeny primárně pro ověření jakosti produkce a zjištění potřebných rozměrů během výroby. Měření je bodové v předem definovaných místech a výsledky jsou většinou porovnávány s CAD modely.

SMS mohou být také použity pro získání rastrovaných dat (tzv. skenování). Těleso umístěné v pracovním prostoru SMS je snímáno měřicími sondami upevněnými v hlavě SMS. SMS mohou být ovládané ručně nebo strojně, měřicí sondy mohou být dotykové nebo bezdotykové. Výsledkem měření kontaktními sondami je síť bodů, jimiž proložená plocha je ekvidistantou ke skutečné ploše snímaného tělesa. Obě plochy jsou od sebe vzdáleny o poloměr kuličky měřícího doteku. Naproti tomu body změřené bezdotykovými sondami odpovídají bodům ležícím na povrchu snímaného tělesa. Příkladem bezkontaktní měřicí hlavy je laserová sonda. Tyto sondy mohou snímat jednotlivé body nebo více bodů současně, což výrazně zvyšuje rychlost skenování. Rychlost skenování takovou sondou může být až 10 000 bodů/sec s přesností 0,025 mm. Rastrovaná data lze pak použít přímo jako obrazová 3D data.

V úvahu také připadá využití **mechanické energie tekutin** například pro odměřování vzdálenosti na základě změny tlaku v trysce nad měřeným objektem. Podstatou funkce je převod tlaku na délkovou veličinu. Převodník je napájen vzduchem o tlaku 0,6 až 1 MPa, obvykle z běžného dílenského rozvodu vzduchu. Pomocí přesného redukčního ventilu je tlak stabilizován na 150 kPa a vzduch následně proudí stavitelnou tryskou do vlastního vzduchového měřidla. Mezi tryskou a vzduchovým měřidlem je paralelně vřazen snímač převádějící tlak na elektrický signál, který je následně pomocí A/D převodníku převeden a vyhodnocován měřícím programem v počítači. Charakteristika tlak – vzdálenost trysky od měřeného povrchu je v rozsahu 0,1 mm lineární. Přesnost měření je obvykle 1 % z měřeného rozsahu nebo 0,001 mm. Vzduchová měřidla jsou poměrová, obvykle se před měřením kalibrují pomocí 2 etalonů, pomocí kterých se vytvoří převodní charakteristika.

Nejmenší rozsah měření není u pneumatických měřidel prakticky omezen, reálně se však vzduchová měřidla používají pro měření v řádu mikrometrů. Problematictější bývá měření v pásmu větších rozsahů, kdy při měření v rozsahu větším než 0,3 mm dochází ke zhoršení linearit [52]. Použití tohoto typu snímače tak není často vhodné vzhledem k malému rozsahu měření a také možnému ovlivnění měřeného objektu.

Dotykovou technologií pro získání obrazových dat mohou být drsnoměry vybavené zařízením pro 3D topografii. Drsnoměr pak měří v několika stovkách řezů posunutých o několik μm . Obrazová data jsou pak získána následným počítačovým zpracováním. Rozsah měřených vzdáleností je podle typu drsnoměru v řádech stovek μm .

3.7 Magnetická rezonance

Magnetická rezonance (MRI, Magnetic Resonance Imaging, [44, 53]) využívá intenzivního magnetického pole a radiových vln, kap. 3.1.10. Fyzikální princip magnetické rezonance je založen na jevu nukleární magnetické rezonance (NMR). Ta využívá skutečnosti, že protony stejně jako neutrony mají určitý vlastní moment, tzv. spin, díky němuž získává celé atomové jádro určitý magnetický moment. V lékařské praxi se využívá především vlastností vodíku (^1H), který je snadno detekovatelný a je hojně zastoupen v molekulách vody, která tvoří více než 60 % hmotnosti lidského těla.

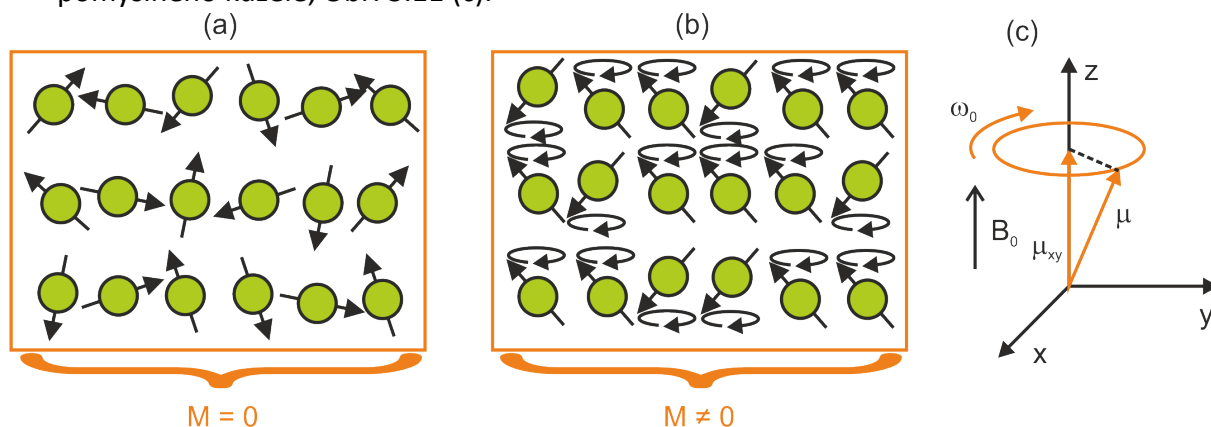
Za normálních okolností (bez působení vnějšího magnetického pole) je orientace rotačních os jednotlivých protonů zcela náhodná. Navenek tak biologický objekt (např. tkáň) jako celek nevykazuje žádné magnetické vlastnosti Obr. 3.11 (a).

Po expozici v silném vnějším magnetickém poli dojde ke dvěma zásadním změnám:

- 1) Dojde ke srovnání magnetických momentů (os rotace) s vnějším magnetickým polem. Proton se pak nachází v jednom ze dvou energetických (kvantových) stavů. Vektor jeho magnetického momentu může být orientován „paralelně“, tj. ve shodě se směrem vnějšího magnetického pole (energeticky méně náročný stav), nebo „antiparalelně“, tj. protichůdně k tomuto směru (energeticky náročnější stav). Ve zvoleném objemu tkáně

tak bude možno pozorovat výsledný vektor tkáňové magnetizace M_z , který je orientován stejně jako vnější magnetické pole a přispívá tak k jeho nepatrnému zesílení, Obr. 3.11 (b).

- 2) Protony začnou vykonávat ještě jeden typ pohybu. Kromě „rotace“ kolem vlastní osy vykonávají navíc tzv. precesní pohyb, který si lze představit jako pohyb po plášti pomyslného kužele, Obr. 3.11 (c).



Obr. 3.11 Vliv expozice v silném vnějším magnetickém poli na látku: (a) látka umístěná mimo magnetické pole, (b) látka umístěná v magnetickém poli, (c) precesní pohyb magnetického momentu, podle [44]

Frekvence precesního pohybu (nazvaná Larmorovou frekvencí, f_0) závisí jednak na intenzitě vnějšího magnetického pole B_0 , jednak na typu atomového jádra, vyjádřeném gyromagnetickým poměrem γ_0 :

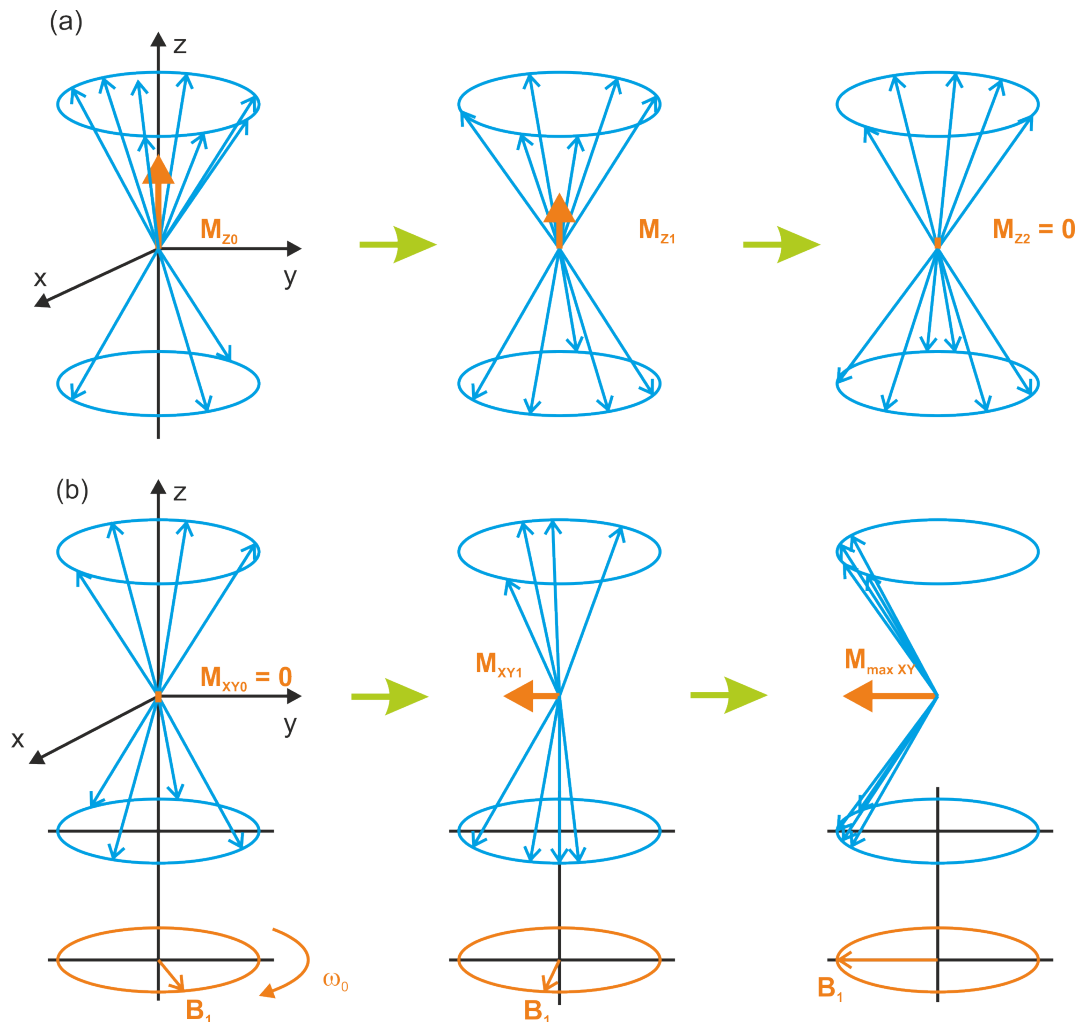
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \gamma_0 B_0; (\omega_0 = \gamma_0 B_0) \quad (3.19)$$

Např. pro vodík $1H$ je gyromagnetický poměr $\gamma_0 = 26,75 \times 10^7 \text{ T}^{-1}\text{s}^{-1}$, tzn., že v poli $B_0 = 1,5 \text{ T}$ budou mít vodíková jádra frekvenci precesního pohybu $f_0 = 63,87 \text{ MHz}$ (frekvence spadá do radiových vln). Vnější magnetické pole tak produkuje v látce vektor magnetizace M_0 , který má ovšem stejný směr jako indukce magnetického pole B_0 , tedy směr osy z , Obr. 3.11 (c). Měření vektoru magnetizace je v takovém případě nemožné, protože magnetický signál látky je překryt mnohem silnějším vnějším magnetickým polem. Aby bylo možné magnetický signál látky detekovat, je zapotřebí vektor magnetizace vychýlit z osy z do roviny xy , kde není signál maskován vnějším magnetickým polem (v této rovině je pak umístěn detektor – přijímací cívka).

Vychýlení vektoru magnetizace je docíleno excitací protonů, tj. dodáním vhodné energie např. pomocí elektromagnetického pulzu s frekvencí, která odpovídá rezonanční (Larmorově) frekvenci precedujícího protonu. Protony tak s elektromagnetickým impulsem na dané frekvenci rezonují (odtud název "magnetická rezonance"). Ve výše uvedeném příkladu je to $f_0 = 63,87 \text{ MHz}$. Tyto excitační pulzy jsou často označovány jako radiofrekvenční impulzy (RF impulzy).

Přísun energie má na tkáňové protony dvojitý účinek:

- 1) Více protonů nyní může být orientováno antiparalelně (větší energetická náročnost), čímž dojde k narušení rovnováhy ustavené v tkáňovém objemu vnějším magnetickým polem. Dochází tak ke změně velikosti podélné složky (ve směru osy z) tkáňové magnetizace M_z až po nulovou hodnotu v ose z , Obr. 3.12 (a).



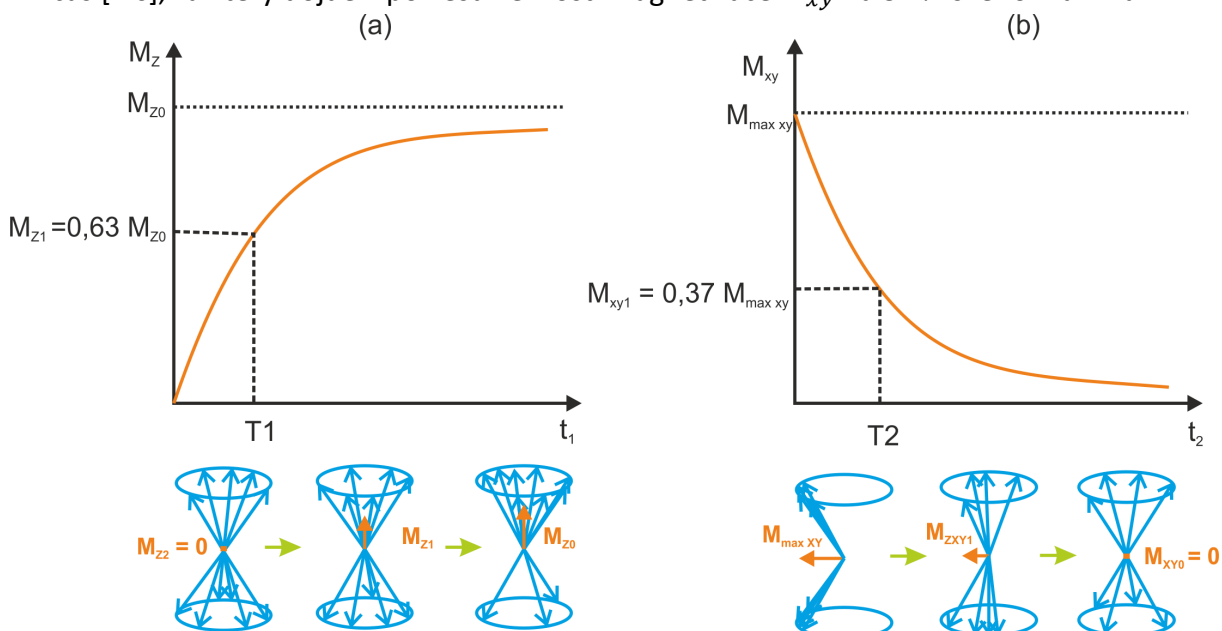
Obr. 3.12 Vliv radiofrekvenčního pulzu na částice v ose z (a) a v rovině os x a y (b)

- 2) Elektromagnetický impuls (vytvoří vnější magnetické pole B_1) sjednotí fázi všech precedujících protonů, což vede ke vzniku příčné složky vektoru M_{xy} (v rovině xy) tkáňové magnetizace (tento byl dosud nulový), Obr. 3.12 (b).

Tyto dva děje probíhají samozřejmě souběžně. Po dodání energie 90° RF impulsem (vektor M_z se sklopí právě o 90°) rotuje vektor tkáňové magnetizace M_{xy} v rovině xy . Je-li pak do roviny xy umístěna přijímací cívka, bude se v ní indukovat napětí. Takto získaný signál se označuje zkratkou FID (Free Induction Decay) a má tvar harmonického průběhu s exponenciálně klesající amplitudou. Jestliže přestane elektromagnetický impuls na tkáň působit, dojde k tzv. relaxaci. V tkáňovém okrsku dochází k navrácení z excitovaného do původního rovnovážného stavu.

Následné relaxační mechanismy jsou rozlišovány dvojího typu:

- 1) Spin-mřížková interakce (relaxace t_1 , podélná relaxace – longitudinální), Obr. 3.13 (a). Výsledný vektor tkáňové magnetizace zpětně nabývá svou velikost ve směru osy z. Průběh nárůstu v čase má charakter exponenciály a můžeme ho znázornit tzv. t_1 křivkou, kde konstanta T_1 udává čas, za jaký dojde k obnovení velikosti magnetizace M_z na 63 % své původní velikosti [s].
- 2) Spin-spinová interakce (relaxace t_2 , příčná relaxace – transverzální), Obr. 3.13 (b). Indukovaný FID signál je maximální ihned po skončení RF impulsu. Poté, vlivem magnetických polí jednotlivých částic, které způsobují drobné lokální nehomogenity magnetického pole, budou jednotlivé protony precedovat s nepatrně rozdílnými frekvencemi a dojde tak k postupné ztrátě fázové jednotnosti precedujících protonů a tím také k zániku příčné složky vektoru tkáňové magnetizace M_{xy} . Změnu velikosti v čase popisuje t_2 křivka, která má charakter exponenciály. T_2 relaxační konstanta pak udává čas [ms], za který dojde k poklesu velikosti magnetizace M_{xy} na 37 % svého maxima.



Obr. 3.13 Relaxační mechanismy: (a) exponenciální průběh longitudinální relaxace s definovanou konstantou T_1 , (b) exponenciální průběh transverzální relaxace s definovanou konstantou T_2

K získání obrazů tkání, které se liší svými relaxačními časy či protonovou hustotou, se užívají tzv. sekvence (sled elektromagnetických impulsů a následných měření elektromagnetického signálu vydávaného relaxující tkání).

Samotné měření FID signálu ovšem k rekonstrukci MRI obrazu nestačí, protože není známá přesná pozice ve scéně, ze které přišel signál (odkud byl vyzářen). K určení přesné pozice zdroje signálu slouží poziční kódování, které je realizováno třemi přídavnými gradientními cívkami, které generují gradientní magnetické pole G_x , G_y a G_z v osách x , y a z . Magnetické gradienty se superponují přes hlavní magnetické pole B_0 a řízeně narušují jeho homogenitu. Gradient G_z slouží k výběru tomografie, gradienty G_x a G_y určují pozici

voxelu ve zvolené tomografii.

Magnetická rezonance je spojována především s uplatněním v lékařství. Její použití je logické s ohledem na nejvyšší dosahovanou citlivost této metody u jader vodíku – ^1H (protonů). Proto nejširší škála dostupných měřicích technik se zaměřuje na molekuly vody, hojně zastoupené v biologických vzorcích. Prostorové rozlišení je v současné době $0,05 \times 0,05 \times 1 \text{ mm}$.

Průmyslová technologie NMR zobrazování a/nebo spektroskopie se mohou uplatnit i v různých oblastech chemického, potravinářského, stavebního průmyslu, zemědělství či energetiky, například při:

- charakterizaci porézních materiálů a gelů relaxometrickými a difúzometrickými metodami,
- měření magnetické susceptibility materiálů,
- vývoji biotechnologií,
- vývoji a aplikacích polymerů, polymerních kompozitů a
- vývoji léčiv.

3.8 Charakteristika získaných obrazových dat

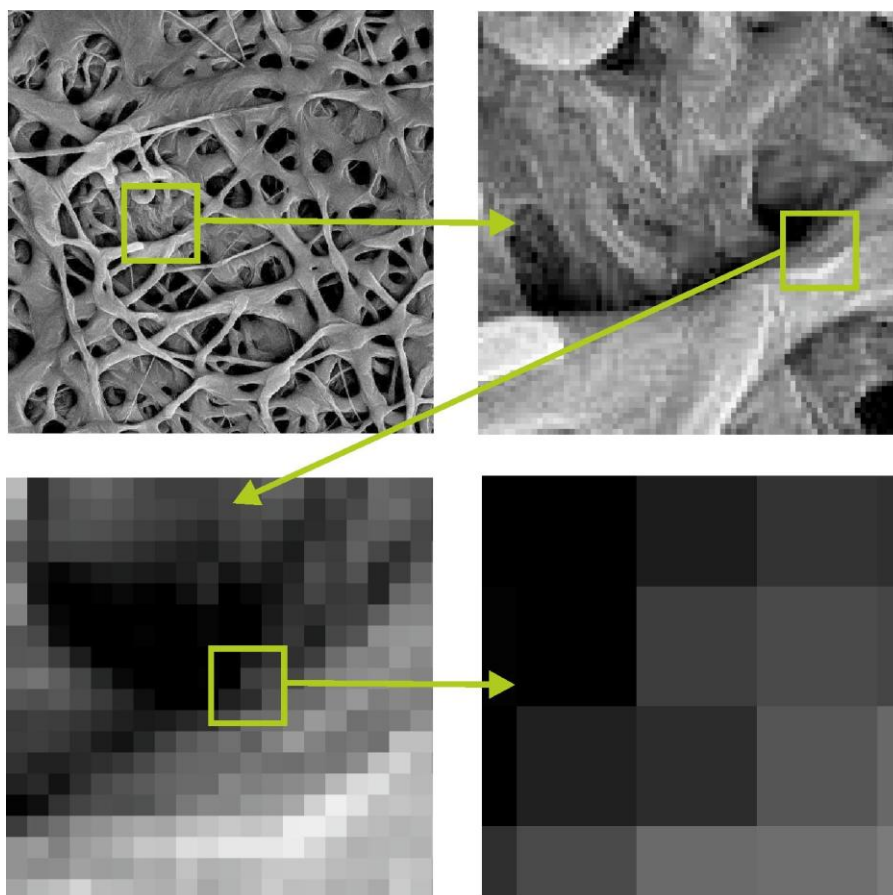
Za pomoci principů zmíněných v předchozí kapitole jsou získána obrazová data – obraz, což jsou rastrovaná data, která jsou upraveným obrazem reálného světa (objektu, scény). Informace obsažené v obrazových datech jsou konečné a omezeny vlastnostmi snímacích zařízení. Snímače obrazové funkce f_b jsou většinou zdrojem spojitěho signálu, který je zesílen a pomocí A/D převodníku převeden na diskrétní signál (digitalizován) do k intervalů. U obrazu z monochromatické kamery je v podstatě měřen jas („množství dopadajících fotonů“ na světlocitlivou buňku), v případě elektronového mikroskopu je to „množství elektronů“ dopadajících na citlivou buňku, u termovizních snímků je to teplota sledovaného objektu (intenzita a frekvence dopadajícího záření vyšších vlnových délek), schopnost pohlcovat záření v daném místě objemu u tzv. rentgenu atd.

3.8.1 Digitální obraz

Získaná funkce je převedena ze spojitě na diskrétní a nabývá celočíselných hodnot, což je nazýváno kvantování. Vzniká tak digitální obraz a ten je dále z principu snímání reprezentován maticí $U \times V$ bodů (Obr. 3.14), které jsou nazývány pixely a mají konečné rozměry (nazýváno vzorkování). Obraz je reprezentován maticí celých čísel \mathbf{f}_b , [14, 3]

$$\mathbf{f}_b = \begin{bmatrix} f_b(1,1) & \dots & f_b(1,V) \\ \vdots & & \vdots \\ f_b(U,1) & \dots & f_b(U,V) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Digitální obraz je tak zjednodušenou reprezentací reálného světa. Obecně vzato, kvalita digitálního obrazu je úměrná plošnému, spektrálnímu, radiometrickému a časovému rozlišení, kap. 3.1.7.4. Digitální obraz je tak aproximací původního spojitého analogového obrazového signálu, který již sám o sobě je velkým zjednodušením reálného světa.



Obr. 3.14 Zvětšení části digitálního obrazu až po zřetelnou matici bodů (pixelů) [3]

3.8.2 Šum v pořízeném obraze

Se získáváním digitálního obrazu je spojeno několik charakteristických problémů. Některé z nich přímo či nepřímo souvisejí se snímačem, jako je šum, u optických snímačů dále vinětace, blooming.

Šum vzniká z mnoha různých příčin. Šum může způsobovat zdroj detekované energie, sledovaný objekt s pozadím a samotný snímač. V případě snímačů pro optické záření je základní příčinou **tepelný pohyb krystalové mřížky polovodiče** (označován pojmem „temný proud“, dark current). Při něm se občas uvolní elektron bez jakéhokoliv působení fotonu. Takový elektron je přitažen k expoziční elektrodě a přičítá se k hodnotě světelné expozice dané buňky. Protože okamžitá hodnota šumu se liší buňku od buňky a expozici od expozice, je nemožné z obrázků tento šum stoprocentně odstranit. Šum u snímačů pro optické záření ovlivňují především tyto faktory: velikost světlocitlivé buňky (šum generovaný v malé

světlocitlivé buňce je prakticky stejný jako u 3× větší buňky), zahřívání snímače (vyšší teploty snímače vedou k větší pravděpodobnosti náhodného uvolňování elektronů), intenzita (jas) dopadajícího světla na snímač (méně dopadajícího světla zvyšuje relativní poměr šumu SNR¹¹), expoziční doba (delší expozice způsobuje vyšší šum) a elektromagnetické pole (šum se zvyšuje s intenzitou elektromagnetického pole). Podobné faktory ovlivňují šum i u dalších snímačů pracujících na principech detekce dalších druhů energie. Obecně lze u snímačů uvést faktory ovlivňující šum:

- velikost buněk ve snímači,
- zahřívání snímače, které vede k pochodům projevujícím se stejně jako detekovaná energie,
- množství dopadající energie na citlivé buňky snímače, kdy méně energie zvyšuje relativní poměr šumu SNR (samozřejmě, množství energie nesmí překročit detekční schopnosti buňky),
- délka expozice citlivých buněk danou energií (delší expoziční časy způsobují často zvýšení šumu),
- v některých případech má vliv elektromagnetické pole, které s vyšší intenzitou zvyšuje šum.

Problém je možné řešit několika přístupy. Prvním je zvětšení velikosti buňky snímače, která má být co největší. Dosáhne se tak vyšší citlivosti buňky a tím relativního snížení poměru šumu. Proto malé formáty snímačů a/nebo snímače s vysokým rozlišením mají vždy výrazně horší šumové vlastnosti než snímače větší a/nebo s nižším rozlišením. Další možností je snížení šumu chlazením snímače. Třetí a pro technickou praxi nejvhodnější je zvýšení dopadající detekovatelné energie na snímač a tím snížení SNR. Znamená to například pro optické snímače zvýšit intenzitu osvětlení technologické scény, která je snímána (nejběžnější je zvýšení světelného toku zdroje světla). Otevření clony a prodloužení času závěrky (při zachování hodnoty EV) u snímačů optického záření sice zvýší množství dopadajícího světla, ale prodlouží dobu osvitu, což zvyšuje šum. Se šumem se lze následně vypořádat pomocí různých softwarových filtrů. Zajímavým řešením je pořízení dvou a více snímků jdoucích krátce po sobě, které jsou tak prakticky shodné až na náhodný šum. Lze tak vcelku přesně stanovit, jak velká je intenzita šumu v jednotlivých buňkách a softwarově šum odstranit.

¹¹ SNR – Signal Noise Ratio, poměr mezi nezkresleným signálem a šumem

4 Současné možnosti interpretace obrazových dat

Pořízená obrazová data mohou sloužit k posouzení operátorem (v technické praxi) nebo lékařem. Tento přístup je častý v lékařství, kdy za veškerá rozhodnutí musí nést odpovědnost člověk. Ovšem samotné snímání, uložení a zobrazení obrazu v počítači není strojovým viděním. Cílem je, aby systém strojového vidění pro danou úlohu porozuměl obrazu na základě správné interpretace s patřičnou mírou robustnosti. Jedná se tak o získání použitelné informace pro další zpracování nebo využití. Je zde zřejmá snaha napodobit proces vnímání člověka na základě informace obsažené v obraze.

Tato část je opět teoretická, proto veškeré znalosti a rovnice jsou přejaté z uvedených zdrojů v textu anebo jsou natolik obecné, že není třeba odkazovat na zdroj.

Interpretaci obrazových dat je třeba chápat jako klíčovou u strojového vidění, nicméně v této práci uváděné využití je zaměřeno především na získání informací o jakosti, případně znalostí o daném procesu, získání softwarového 3D modelu a získání souřadnic a výběr objektu pro navedení chapadla robotu na objekt. Jedná se stále o strojové vidění, přestože není využito pro zvýšení „inteligence“ stroje, rozpoznávání okolí a orientaci v prostoru, tak jak je pojem strojového vidění často laicky vnímán.

Zde uváděná metodika pro interpretaci obrazových dat má obecně tyto pod-procesy (s odkazem na znalostní pyramidu, kap. 2):

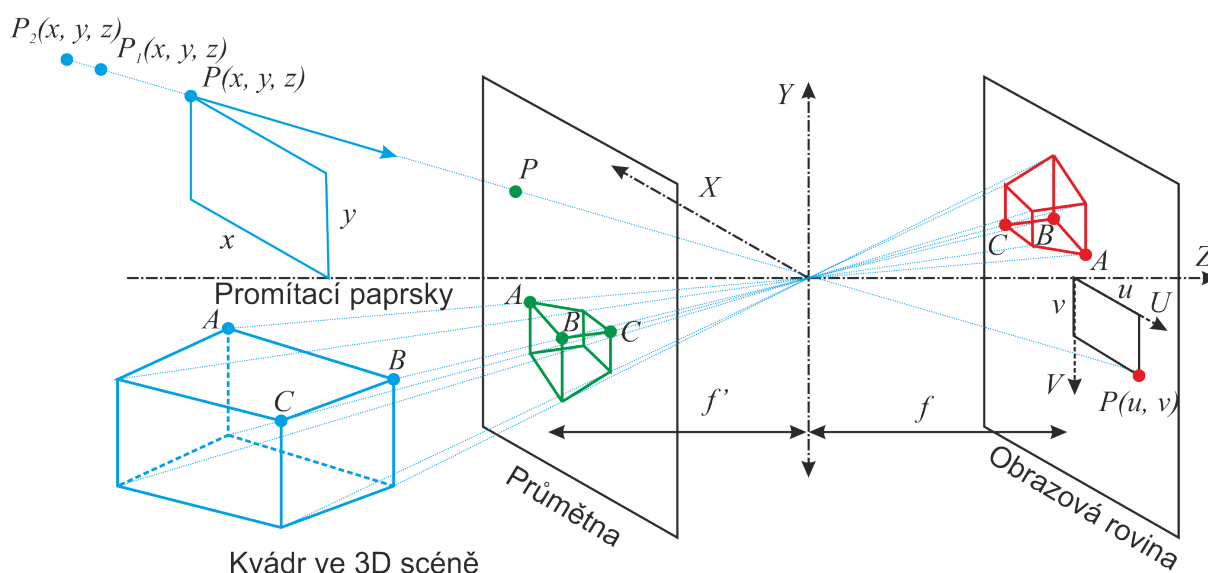
- 1) Příprava snímaného vzorku pro požadované získání obrazových dat.
- 2) Snímání obrazových dat (získání obrazové funkce).
- 3) Interpretace obrazových dat (zpracování dat, analýza obrazových dat) vedoucí k získání informací.
- 4) Zpracování informací vedoucí k získání jakosti sledovaného objektu, znalostí o hodnoceném procesu (např. korozi vzorku za různých podmínek) nebo souřadnic sledovaného objektu pro následné navedení stroje (chapadla).

Při plně automatických procesech první pod-proces vypadává. Pod-proces 3 je následně popsán v této kapitole, neboť je procesem obecným. Ostatní pod-procesy jsou více vázány na dané aplikace strojového vidění, a proto jsou popsány podrobněji až v kapitolách zaměřených na uplatnění strojového vidění (kap. 5 a 6).

4.1 Obecná problematika interpretace obrazových dat

Interpretace obrazových dat je prováděna pomocí vhodných algoritmů, tzv. analýzou obrazu (image analysis) a je ovlivněna několika základními problémy, které ji činí komplikovanou (podle [14]):

- 1) **Ztráta informace při perspektivním zobrazení.** Obraz získaný z plošných senzorů (a dále nerozšířený o další data) je zobrazením 3D světa pouze ve dvou rozměrech, kap. 2 a Obr. 4.1. Z obrázku je zřejmé, že všechny body ležící ve 3D prostoru na jedné polopřímce od středu promítání směrem do scény se zobrazují do jediného bodu. Tím se ztrácí informace nutná k úplnému popisu reálného světa a perspektivní zobrazení tak není invertovatelné. Geometrická úloha, která má měřit, rekonstruovat či rozpoznat 3D objekty z jejich jediného 2D obrazu, je nedostatečně podmíněná. Lze ji pak řešit jen pomocí využití dalších znalostí (projektivní geometrie) a/nebo dalších dat (obrazová data z dalšího snímáče, případně i bodová nebo liniová data, definice polohy objektu vůči snímáči atd.). Respektování ztráty části dat je nutné i u relativně jednoduchých úloh jako je detekce tvaru.



Obr. 4.1 Geometrie perspektivního promítání bodu a kvádru, zobrazení průmětny, tzv. model dírkové komory [3]

- 2) **Komplikovaný a nejednoznačný vztah mezi změřenou energií a detekovanými vlastnostmi snímaných reálných (3D) objektů (nejčastěji jejich tvaru).** Změřená energie v jednotlivých bodech (pixelech), kterou měří obrazové snímáče, závisí na mnoha vlivech a nemusí být spojena s vlastnostmi objektu. Příkladem je detekce tvaru, při které má na samotnou spolehlivost detekce vliv (často rozdílná) odrazivost povrchů jednotlivých pozorovaných objektů a pozadí technologické scény pro dané spektrum, jejich případná transparence, orientace objektů a prvků pozadí vůči snímáči, poloha a parametry zdrojů energií, která je následně detekována (např. elektromagnetického záření, což jsou osvětlovače scény, další zdroje VIS, IR, UV, rentgenového, gama záření atd.). Obecně, volba správného zdroje energie, její intenzity, volba správné polohy sledovaného objektu

(orientace a vzdálenosti od snímače), eliminace rušivých vlivů pozadí, eliminace dalších (nechtěných) zdrojů energie (která je detekována snímačem), eliminace nechtěných (parazitních) odrazů a propustnosti detekované energie objekty i pozadím a další jsou nezbytné pro efektivní funkci strojového vidění.

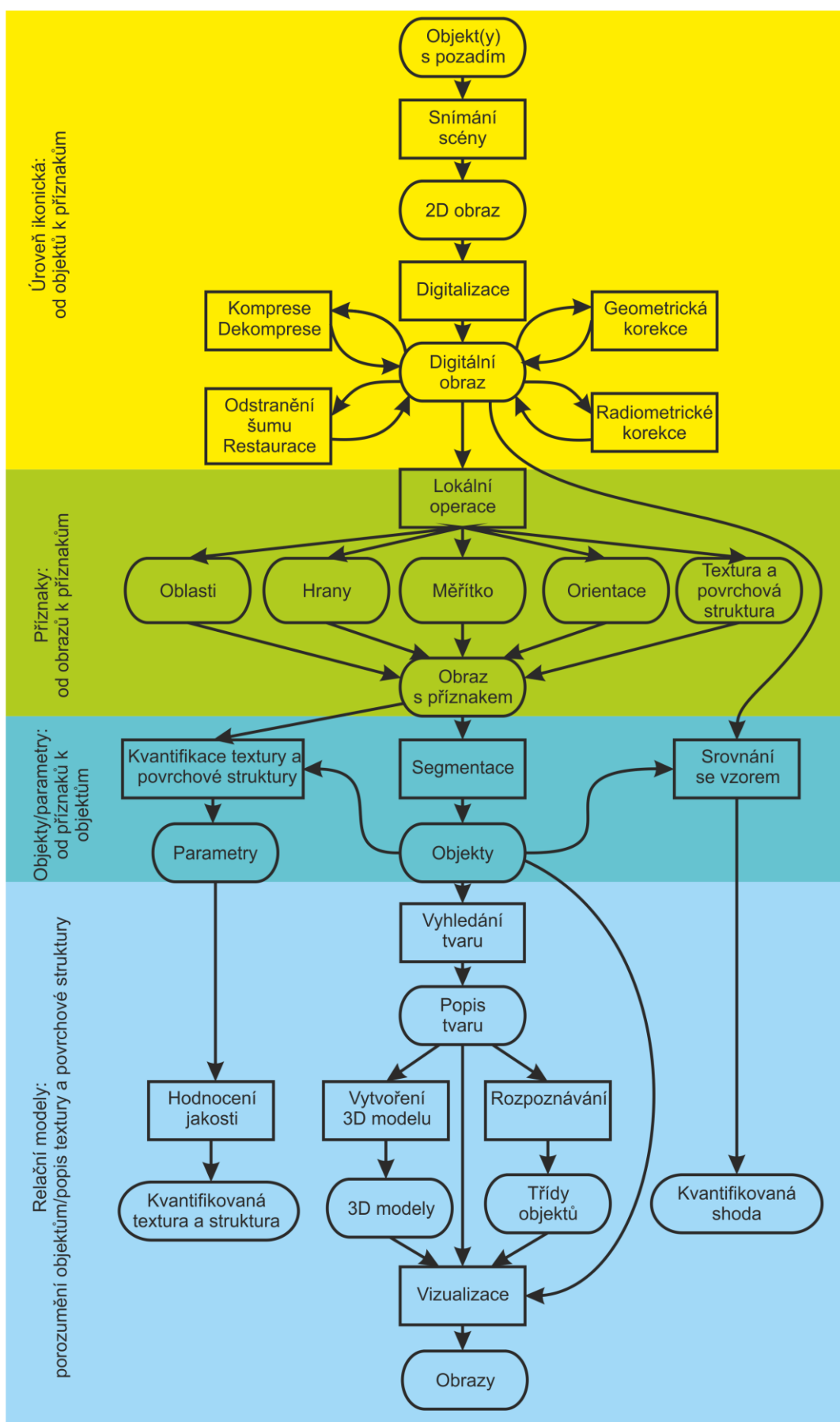
- 3) **Velké množství obrazových dat.** Tento problém je nutné respektovat i při stále se zlepšujících výkonech řídicích jednotek kamer (např. klasických PC). S výkonem počítačů se neustále zvyšují i rozlišovací schopnosti snímačů. Příkladem mohou být opět snímače pro optické záření (především VIS). Pokud by mělo být využíváno jejich plného rozlišení, maximální frekvence snímání a datově neupraveného formátu RAW, pak datový tok bude tak velký, že neumožní zpracování i relativně jednoduchých úloh. Při návrhu systému je tak třeba zvážit rychlosti sledovaného procesu, nutné rozlišení snímače, předzpracování dat ve snímači (vč. komprese) a náročnost obrazové analýzy.
- 4) **Šum je v obraze reálné scény přítomen vždy** (kap. 3.8.2). Při potřebě tento šum eliminovat je nutné použít hardwarové opatření nebo následně softwarových nástrojů, které ale komplikují a tedy i zpomalují analýzu obrazu. Při reálném vývoji aplikace pro strojové vidění je třeba toto respektovat, v náročných aplikacích snižovat jeho vliv a v běžných nenáročných aplikacích volit různá zjednodušení nebo vytvořit dostatečně robustní analýzu.
- 5) **Vztah mezi pozorovaným detailem a zjišťovaným celkem.** Z důvodu např. náročnosti analýzy se v reálném nasazení strojového vidění často hodnotí jen malý výřez obrazu. Ten neumožňuje zjistit globální vlastnosti obrazu, které mohou být také důležité.

Interpretace obrazových dat je založena na několika úrovních úloh, které umožňují ze snímaného obrazu získat potřebné informace o sledovaném objektu a ty správně interpretovat. Podle [14] interpretace obrazu znamená zobrazení: pozorovaná data → model.

Model vždy představuje potřebné zjednodušení reálného světa a také vzhledem k zobrazení 3D světa ve 2D má svá omezení. Jednotlivé úrovně reprezentace obrazové funkce (zpracování dat) lze hrubě rozdělit (podle [14] s úpravou) na:

- 1) **Ikonicou** – jsou to digitální obrazy ve formě celočíselných matic po případném předzpracování snímků pro vylepšení obrazu (softwarové filtry, geometrické a jasové korekce).
- 2) **Příznaky** – části obrazu jsou spojeny do skupin, které pravděpodobně patří k jednotlivým objektům nebo je připravena textura a povrchová struktura pro další analýzu.
- 3) **Objekty/parametry** – jsou výsledkem segmentace, tj. úplné interpretace dat. Patří sem i získané parametry, které kvantifikují danou texturu a povrchovou strukturu.
- 4) **Relační modely** – popisují kvantitativní i kvalitativní vlastnosti objektů. Strojové vidění využívá technik rozpoznávání a umělé inteligence.

Jednotlivé kroky zpracování dvojrozměrných obrazů lze vyjádřit jako úlohy, které umožňují splnění cíle analýzy obrazu a dovolují přechod mezi jednotlivými výše zmíněnými reprezentacemi. Zpracování a analýzu 2D a 3D obrazů lze vyjádřit podle blokového schéma, které vychází z [14], Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Hierarchie úloh zpracování obrazu, vychází z [14]

4.2 Nástroje interpretace obrazových dat

Je obtížné vyjmenovat všechny potenciálně možné nástroje pro interpretaci obrazových dat. Často je použita sekvence několika nástrojů, které na sebe navazují a vedou nakonec k požadované informaci s patřičnou mírou spolehlivosti výsledku. Na druhou stranu je tak možné mezi nástroje pro interpretaci zahrnout nejen úroveň objektů/parametrů, ale i ty, co se zabývají předzpracováním dat a jejich následným postprocesingem. Používanými nástroji jsou pak: geometrické a jasové korekce, filtrace, diskrétní lineární integrální transformace, lokální operace (např. detekce rozhraní, kvantifikace textury atd.), matematická morfologie (binární a šedotónová), dále pak skelety objektů, granulometrie, segmentace srovnání se vzorem, kvantifikace povrchu, dále vyhledání tvaru a hodnocení povrchu.

Problematikou zpracování a interpretace obrazových dat se zabývá mnoho publikací např. [14, 54, 55, 56] a také odborné texty autora této práce [4]. Jedná se o velmi široký obor s mnoha specializacemi. V této práci je tak jen zmíněno několik nástrojů, které jsou přímo spjaté s řešenou problematikou interpretace obrazových dat u povrchové struktury (kap. 5) a interpretace obrazových dat u objektů z transparentních materiálů a s lesklým povrchem (kap. 6).

4.2.1 Transformace jasové stupnice

Získaný snímek je kvantován na určitý počet hodnot jasu, které nabývají celočíselných hodnot [14, 4]. Jasová stupnice u monochromatického obrazu získaného ve VIS (případně NUV nebo NIR) často dosahuje $b = 8$ bitů (2^8), tedy $k_j = 256$ hodnot odstínů jasu (šedi), kap. 3.1.7.4. Transformace jasové funkce se provádějí především z důvodu snazší interpretace vizualizovaného obrazu. Ta může být použita jak z pohledu interpretace člověkem, tak i při zpracování počítačem. U strojové interpretace je třeba tyto transformace minimalizovat a provést jen v těch případech, kdy je to nutné (např. při prahování), jinak mohou tyto transformace mít negativní vliv v důsledku ztráty dat a tedy i možné informace.

Transformace jasové stupnice se provádí pro všechny pixely v obraze. Transformace T výchozí jasové stupnice $p = \langle p_0, p_k \rangle$ na novou jasovou stupnici $q = \langle q_0, q_n \rangle$ je dána vztahem

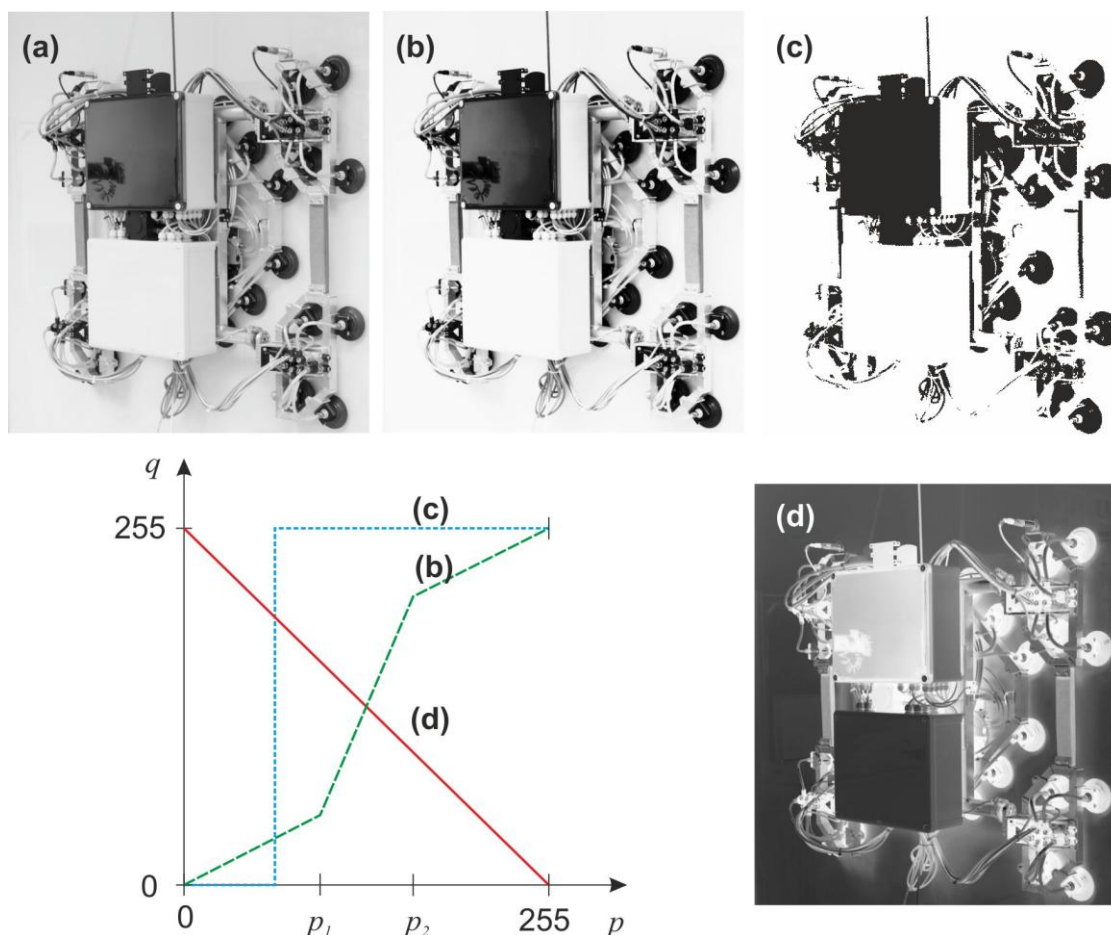
$$q = T(p) \quad (4.1)$$

Příklady obvyklých transformací jasové stupnice jsou graficky uvedeny na Obr. 4.3.

Transformace jasové stupnice bývají snadno technicky proveditelné. Při transformaci v obrazových perifériích je vytvořena vyhledávací tabulka (LUT) pomocí paměti o tolika paměťových místech, kolik je jasových úrovní. Nové hodnoty jasu, které jsou výsledkem transformace, jsou obsahem paměti. Vyhledávací tabulka bývá řazena do cesty obrazového signálu, tudíž bývá možné pozorovat výsledek transformace v reálném čase.

V případě barevných obrazů je princip stejný, jen je aplikován na každou z matic

barevného signálu. V případě RGB je na každou ze tří matic uplatněn daný filtr. Opět může být řazena vyhledávací tabulka, která provede danou transformaci dané matice, do cesty obrazového signálu. V této souvislosti se takovýmto vyhledávacím tabulkám říká paleta [14].



Obr. 4.3 Obvyklé transformace jasové stupnice: (a) původní snímek, (b) zvětšení kontrastu mezi jasy p_1 a p_2 , (c) prahování, (d) negativ [3]

4.2.2 Prahování

Nejčastěji používaným nástrojem transformace jasové stupnice ve strojovém vidění pro odlišení oblastí objektů od pozadí je prahování. Je to také nejjednodušší operace pro získání objektů v obraze, tedy segmentaci. Jedná se o získání binárního obrazu z většinou monochromatického obrazu, ale lze také použít obrazy v barevné škále.

Prahování je založeno na zvolení vhodného prahu a jednoduchého pravidla

$$q = T(p) = \begin{cases} 0, & p \leq t_h \\ 1, & p > t_h \end{cases} \quad (4.2)$$

kde t_h je zvolený práh (prahová hodnota).

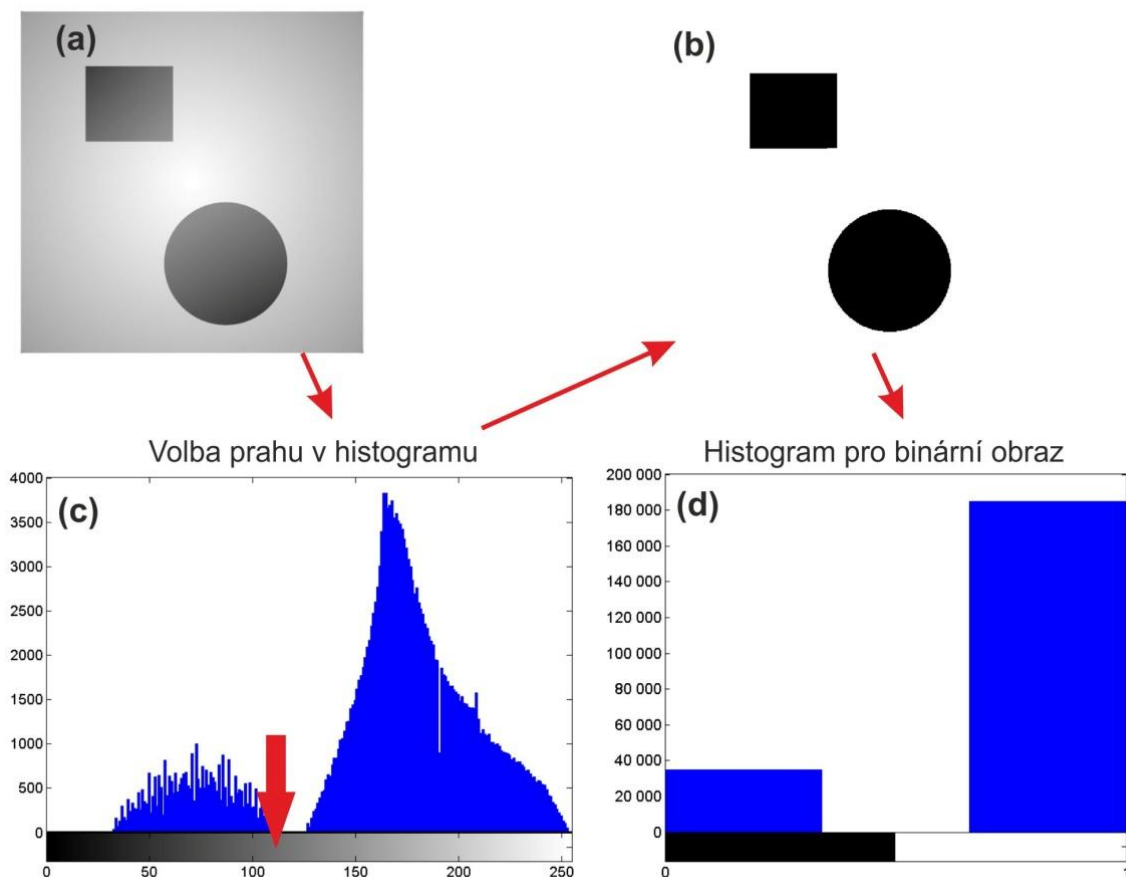
Pro přepočítání původní obrazové funkce $f_b(u, v)$, reprezentované maticí obrazu \mathbf{f}_b o rozměrech $U \times V$ (kap. 2), lze vztah přepsat na

$$\mathbf{B} = \begin{cases} 0, & \mathbf{f}_b \leq t_h \\ 1, & \mathbf{f}_b > t_h \end{cases} \quad (4.3)$$

kde \mathbf{B} je obraz (matice) transformovaný do binární matice, \mathbf{f}_b je původní matice obrazu. Pro monochromatický obraz je matice \mathbf{f}_b (reprezentující 2D snímek) složena z pixelů, které nabývají hodnot 0 až 255 pro 8bitový obraz (Obr. 4.4 a). Pokud je zvoleno za prahovou hodnotu například $t_h = 120$, pak všechny vyšší hodnoty šedi budou reprezentovány barvou bílou (hodnotou 1) a všechny nižší či rovné budou reprezentovány barvou černou (hodnotou 0). Obrázek je pak tvořen pixely, nabývajícími pouze hodnot 0 (černá) a 1 (bílá), tzv. binární obraz Obr. 4.4 b. Barevné obrazy mohou být převedeny pomocí odpovídajícího vztahu do šedé škály a následně převedeny do binární škály prahováním. Také může být použito jen jedné matice barevného modelu k získání binárního snímku zmíněným prahováním (např. u barevného modelu RGB lze použít jen jednu ze tří matic).

Původní snímek v šedé škále

Binární snímek získaný prahováním (práh 120)



Obr. 4.4 Převod monochromatického obrazu na binární a použití histogramu pro volbu vhodného prahu (černá v binárním snímku reprezentuje 0, bílá 1) [3]

Úspěch použití detekce objektu v obraze po prahování je závislý na použití správně voleného prahu. K tomu je vhodné použít histogramu (Obr. 4.4 c) a nalézt takovou hodnotu, pro kterou bude platit, že všechny hodnoty jasu vyšší než práh odpovídají pozadí, zatímco všechny hodnoty nižší než práh odpovídají popředí (pro uvedený příklad). Nehomogenní obraz, obvykle obraz obsahující různě jasné úseky, neumožňuje určit přímo globální práh, je však možné využít metod adaptivního prahování, šedotónovou transformaci vrchní a spodní části klobouku [4] a další.

S nalezením vhodného prahu v histogramu přímo souvisí použití vhodného pozadí a osvětlení. Objekt by měl být nasvícen předním osvětlením s jasným obrazovým polem nebo podsvětlen a měl by být jasně odlišen od pozadí [3].

Prahováním lze získat vedle objektů i struktury. V tomto případě je použito přední osvětlení s tmným zorným polem. Většina poruch a vad je reprezentována ve struktuře obrazu určitým rozmezím stupně šedi. To znamená, že vada či porucha sledovaného objektu v obraze dosahuje jen určitých stupňů šedi a ty lze zviditelnit zavedením prahů. Prahování je tak možné využít pro zviditelnění různých typů vad. Vzniklý binární obraz je dále interpretován.

Vzhledem k metodice získání binárního obrazu lze získat teoreticky 254 binárních obrazů z šedého 8bitového snímku (snímky s prahem 0 a 255 obsahují pouze limitní hodnoty). Binární obrazy mohou být následně každý samostatně analyzovány. Tomuto přístupu se říká dekompozice obrazu pomocí prahování a lze ho například využít při analýze struktur, kdy jsou vyjadřována spektra. Pro každý binární snímek je spočítána jedna směrodatná hodnota (vynesena na osu y), která je následně vynesena do grafu v závislosti na použitém prahu (osa x). Využití této metody je popsáno na příklad v [1, 2].

4.2.3 Získání křivek rozhraní

Pro popis křivek rozhraní pomocí dále popsaných parametrů jsou křivky reprezentovány samostatnými body (matice hodnot pro osu x a y , u 2D snímku).

Křivky rozhraní je možné získat několika postupy. Možné je použít morfologických operací, přesněji operace eroze. Eroze se používá ke zjednodušení struktury (rozložení struktury na jednodušší části) a pro odstranění malých částí. Použít ji lze také pro získání obrysů objektu odečtením erodovaného obrázku od původního. Obrys objektu je možné při správném provedení této operace považovat za křivku rozhraní.

K automatické detekci rozhraní (detekci hran) významných míst v obraze se častěji používá lokální předzpracování, což je v odborné literatuře označováno jako hledání hran. Hrana je určena tím, jak náhle se mění hodnota obrazové funkce $f_b(u, v)$. Ke studiu změn dvou proměnných se využívá parciálních derivací a změnu funkce udává její gradient (vektorová veličina ∇). Velikost (modul gradientu) určuje strmost růstu jasu a směr gradientu největší růst funkce jasu. Pixely s velkým modulem gradientu se nazývají hrany (místa reprezentující rozhraní).

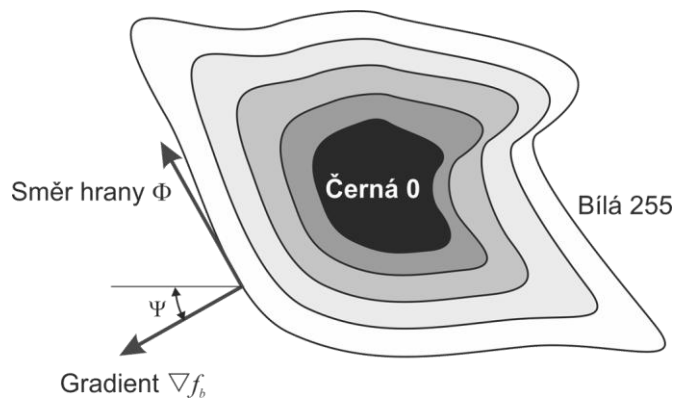
Pro spojitou obrazovou funkci $f_b(u, v)$ jsou modul gradientu a směr gradientu dány vztahy

$$\|\nabla f_b(u, v)\| = \sqrt{\left(\frac{\delta f_b(u, v)}{\delta u}\right)^2 + \left(\frac{\delta f_b(u, v)}{\delta v}\right)^2} \quad (4.4)$$

$$\psi = \arctg\left(\frac{\frac{\delta f_b(u, v)}{\delta u}}{\frac{\delta f_b(u, v)}{\delta v}}\right) \quad (4.5)$$

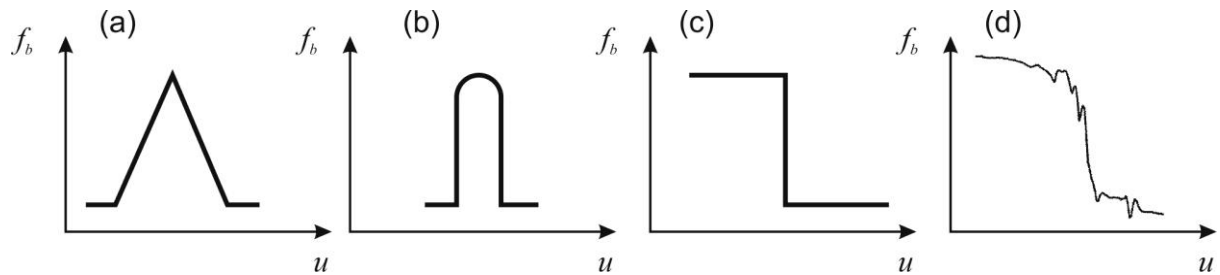
kde ψ je úhel mezi souřadnou osou u a radiusem k bodu (u, v) v radiánech.

Pro hledání hranic objektů v obraze jsou používány lokální operátory. Vychází se z předpokladu, že objektu odpovídá homogenní oblast jasu a pixely s vysokou hodnotou gradientu jsou body hranice. Hranové pixely se spojují do hranic a směr hrany ϕ se často definuje jako kolmý na směr gradientu ∇f_b , Obr. 4.5.



Obr. 4.5 Gradient, směr gradientu ∇f_b , směr hrany ϕ [3]

Hrany lze dobře třídit podle jednorozměrného jasového profilu ve směru gradientu v daných pixelech. Příkladem je skoková hrana, střešková hrana, tenká linie, Obr. 4.6. V reálných obrazech jsou hrany zašuměné.



Obr. 4.6 Jasové profily nejběžnějších hran (idealizované): (a) střešková, (b) linie, (c) skoková a (d) příklad zašuměné hrany [3]

Existuje mnoho gradientních operátorů, od jednoduchých až po vcelku sofistikované nástroje. Mezi jednodušší lze zahrnout jednoduché konvoluční masky aproximující derivace obrazové funkce, např. Robertsův operátor, operátor Prewittové, Sobelův operátor, Robinsonův operátor, Kirschův operátor a další.

V případě, že nejsou požadovány informace o směrových vlastnostech hran a vyžadována jsou jen místa s výrazným rozhraním (hranami), je možné použít všesměrový

lineární Laplaceův operátor – Laplacián ∇^2 , který vychází z druhých parciálních derivací a je tedy invariantní vůči otočení.

Hrany lze detekovat jako průchod nulou druhé derivace obrazové funkce, jak již bylo zmíněno (využívá se Marrovy teorie). Obliba druhé derivace vychází z faktu, že první derivace obrazové funkce nabývá svého maxima v místě hrany, druhá derivace protíná v místě hrany nulovou hodnotu. Hledat polohu hrany v místě průchodu nulou je díky strmosti přechodu mnohem spolehlivější než v případě plochého maxima u první derivace. Použití výše zmíněné aproximace diskrétní konvolucí není ideální. Dále druhá derivace je ještě citlivější na šum než první derivace. Existuje několik postupů jako je například LoG operátor (Laplacian of Gaussian), DoG (Difference of Gaussian) nebo Cannyho hranový detektor.

Pro bližší informace o hranových detektorech a dalších postupech vedoucích k získání křivky rozhraní je možné čtenáře odkázat na odbornou literaturu, např. [4, 14, 57].

4.3 Fraktální geometrie jako nástroj interpretace obrazových dat

V následujícím textu je fraktální geometrie jen hrubě přiblížena a čtenáře je nutné, v případě hlubšího zájmu o tuto problematiku odkázat na odbornou literaturu [2, 58–62], případně na populárně-naučnou literaturu jako je [63].

Fraktální geometrie je součástí obsáhlé teorie chaosu a slouží jako jeden z důležitých nástrojů popisu dynamických, turbulentních a nelineárních dějů. Teorie chaosu spolu s fraktální geometrií zasahuje prakticky do všech vědních oborů. Počínaje meteorologií, přes ekonomiku, biologii, medicínu až po astronomii.

Fraktální geometrie je matematický nástroj pro popis složitě strukturovaných objektů, jejichž charakter se nemění při určitém zvětšení nebo zmenšení. Vhodným příkladem je tvar pobřežní linie. Pokud jsou srovnány dvě mapy různých měřítek, pak charakter pobřežní linie se nemění – pobřeží na obou mapách vypadá stejně. To znamená, že pobřežní linie je měřítkově neměnná, či jinak, nemá charakteristické délkové měřítko [59]. Benoit Mandelbrot si položil jinou otázku: Jaká je podstata tvaru pobřeží? Ta se stala mezníkem úvah v jeho práci: „Jak dlouhé je pobřeží Velké Británie?“ (1967), [64]. Mandelbrot vyšel z poznatků Richardsona, který měřil ostrov Korsiku. Mandelbrot použil pro změření délky pobřeží Velké Británie nejprve satelitních map, v druhém případě pak map turistických. Došel k závěru, že délka změřená z map turistických je 2x až 3x delší než délka změřená z map satelitních. Důvod je následující: turistické mapy jsou mnohem podrobnější než mapy satelitní, což způsobí, že při měření délky pobřeží pomocí mapy satelitní je mnoho detailů zanedbáno či přehlédnuto a tyto detaily se projeví jako důležité při měření z map turistických. Richardson empiricky odvodil vztah mezi délkou a měřítkem:

$$L_K = N(r) \cdot r^D \quad (4.6)$$

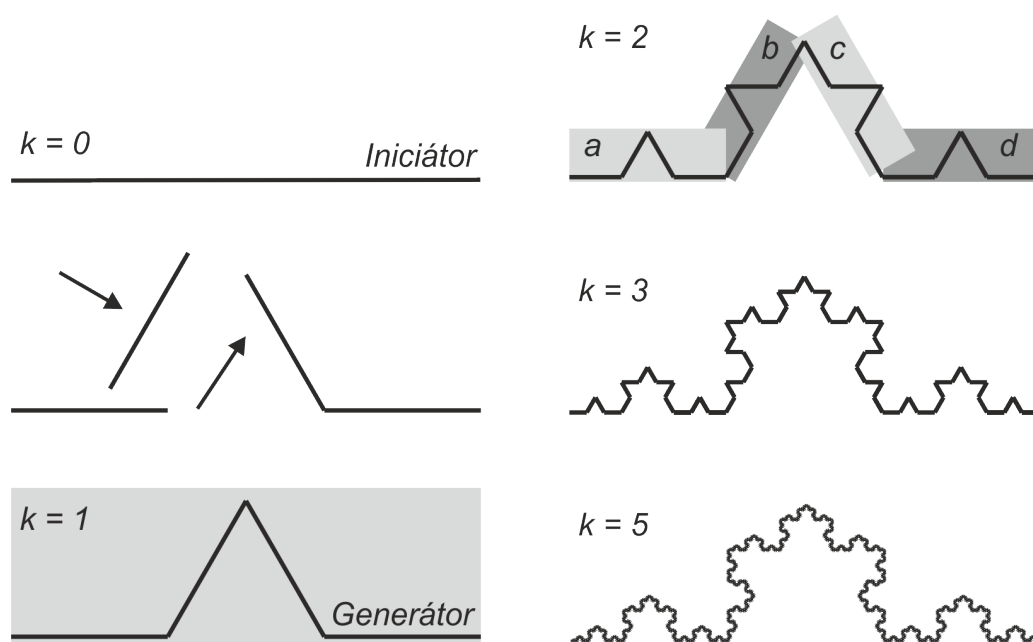
kde L_K je naměřenou délkou, $N(r)$ je počet úseček o délce r potřebných k pokrytí (aproximaci) dané křivky. D je konstanta a představuje fraktální dimenzi, což objevil

Mandelbrot, který našel souvislosti vztahu (4.6) s Hausdorffovou dimenzí a mohl tak označit pobřežní linii za fraktál [58–63]. Výpočet je dále rozvíjen v kapitole o výpočtu obvodové dimenze, kap. 4.3.1.

Mandelbrot slovo „fraktál“ použil pro všeobecné označení objektů, jejichž tvar je nezávislý na velikosti měřítka, pod kterým objekt pozorujeme (měřítková neměnnost). Vyšel z významu latinského slova "fractus". Z něj odvozené slovo "frangere" znamená "rozlámat" – vytvořit nepravidelné úlomky. Jako fraktály se tedy označují nepravidelné geometrické útvary dělitelné na jednotlivé části, z nichž každá je v ideálním případě zmenšenou kopií celku. Jsou to tedy množiny, jejichž geometrický motiv se opakuje v základním tělese a tento jev je nazýván soběpodobnost. Objekt je tedy striktně soběpodobný (deterministický), pokud může být rozdělen na libovolně malé části, které jsou malou replikou původní množiny. Matematické fraktály mohou být také statisticky soběpodobné (stochastické), stejně jako fraktály přírodní, kdy jsou malé úlomky podobné celku jen statisticky. Vedle soběpodobných fraktálů existují také fraktály soběpříbuzné (soběafinní). U těchto fraktálů je třeba znát vedle struktury nepravidelných úlomků i způsob transformace měřítka.

Ve fraktální geometrii je počítána nebo odhadována tzv. fraktální dimenze, která je „charakteristickým číslem“, udávajícím jak složitý je pozorovaný útvar. Může se jednat o povrch nebo strukturu tělesa, časovou řadu nebo množinu bodů. Fraktální dimenze (lze se také setkat s pojmem Hausdorff-Besicovitchova dimenze) matematicky popisuje složitost těchto objektů. Fraktální dimenze v případě fraktálů převyšuje jejich topologickou dimenzi, která je celočíselná (dimenze charakterizovaná bodem, úsečkou, trojúhelníkem a tetraedrem). Z tohoto předpokladu vychází také jedna z definic fraktálů.

Vlastnosti fraktálů je možné popsat na příkladu Kochovy křivky (Obr. 4.7). Pro generaci této křivky je potřeba mít tzv. iniciátor a generátor. Iniciátor v tomto případě představuje úsečku (krok $k = 0$) a generátor je tvar, kterým se iniciátor nahradí. V tomto případě je generátorem útvar vzniklý vyjmutím prostřední třetiny a nahrazením této třetiny dvěma úsečkami délky jedné třetiny. Tuto transformaci si lze také představit jako přerušení úsečky v jedné třetině a nadzvednutí druhé třetiny tak, aby bylo možné vložit novou úsečku délky opět jedné třetiny. Po transformaci je každá strana už považována za iniciátor pro další krok. V každém kroku se nahrazuje každá úsečka (iniciátor) zmenšenou kopií generátoru. Jak je vidět, již v kroku 5 lze získat poměrně komplikovanou křivku.



Obr. 4.7 Generování Kochovy křivky [1]

Kochova křivka má několik zajímavých vlastností typických pro fraktály:

- Křivka je spojitá, sama sebe nikde neprotíná a nemá nikde derivaci.
- Jedná se o křivku striktně soběpodobnou, tedy malá část této množiny bude vždy přesnou zmenšenou replikou původní množiny – je měřítkově nezávislá.
- Délka Kochovy křivky je nekonečná (po nekonečně mnoha iteracích), ačkoliv se vyskytuje na konečné ploše. Důvodem je, že při každém kroku je křivka prodloužena o $1/3$ délky původní. Při nekonečném počtu kroků je zřejmé, že nekonečně mnoho prodloužení povede k nekonečné délce.
- V případě měření délky Kochovy křivky pomocí různých měřitek by délka byla pokaždé jiná. Tato délka by se prodlužovala se zmenšující se délkou měřítka.
- Tato křivka má neceločíselnou fraktální dimenzi $D = 1,2619$, tedy je z hlediska topologického něčím mezi přímkou (která má dimenzi 1) a hladkou plochou (která má dimenzi 2). Neceločíselné dimenze je dosaženo značnou strukturovaností křivky a toto číslo (fraktální dimenze) uvádí „míru složitosti křivky“.

Uvedené vlastnosti Kochovy křivky jsou platné pro většinu fraktálů. Nicméně popis fraktálů a jejich vlastností se liší často podle autorů.

Kochova křivka je představitelem matematického deterministického fraktálu, který je striktně soběpodobný a dobře poslouží pro pochopení fraktální geometrie. Příkladem dalších takovýchto fraktálů je Cantorova množina, Sierpinského těsnění, Sierpinského koberec a další. Nicméně pro použití v reálném světě nemají tyto fraktály velký význam.

Přírodní fraktály oproti matematickým nejsou nikdy striktně soběpodobné, tedy přírodní útvary při zvětšení nejsou přesně identické. Příkladem přírodního fraktálu je již zmíněná pobřežní linie. To je objekt s fraktální dimenzí mezi 1 a 2. S objekty, které lze od určitých měřitek z geometrického hlediska nazvat fraktály, se lze setkat v přírodě i jinde.

V této souvislosti lze mluvit o struktuře na struktuře. Po odlomení části struktury a po dalším zvětšení se objeví další struktura. Při dalším zvětšování bude pozorována další a další struktura, což bude pokračovat až po atomární délky. Fraktály jsou proto pohoří, oblaka, blesky, sněhové vločky, toky řek, stromy i listí, cévní systémy živočichů, komůrky v plicích, DNA, dále i rozložení hmoty v galaxiích, hvězdokupy, ale i povrch obrobku, tvar trhlin i vad v obrobku i nástroji, či dokonce časový vývoj cen na burzách všeho druhu, časové změny inflace, zadlužení států i vývoj kurzu měny.

Protože fraktály se z geometrického hlediska v přírodě vyskytují a jsou její přirozenou součástí, je znalost fraktálů využíváno i při simulacích reálného světa ve virtuální realitě, počítačových hrách a ve filmu. Příkladem může být povrch měsíce ve filmu Apollo 13 režiséra Rona Howarda nebo Titanik, Den po té a další. K tomu, aby bylo možno generovat tyto přírodní struktury, musí být známa mimo jiné fraktální dimenze. U přírodních fraktálů není ovšem znám „algoritmus generování“ útvaru a fraktální dimenzi lze jen odhadovat (více v kap. 4.3.1 a kap. 4.3.2).

Odhad fraktální dimenze lze také použít v technické praxi pro popis míry strukturovanosti, složitosti a deformace komplikovaných objektů nebo dat získaných z reálného prostředí. Fraktální geometrie byla již hlavním tématem disertační práce [1] a následně publikované monografie [2]. Využití tohoto nástroje bylo prezentováno na několika typech dat:

- a) Popis a vyhodnocování časových posloupností (časových řad) získaných z výrobního procesu.
- b) Popis a vyhodnocování povrchů, vad a poruch ve formě 2D snímků.
- c) Vyhodnocování křivek rozhraní.

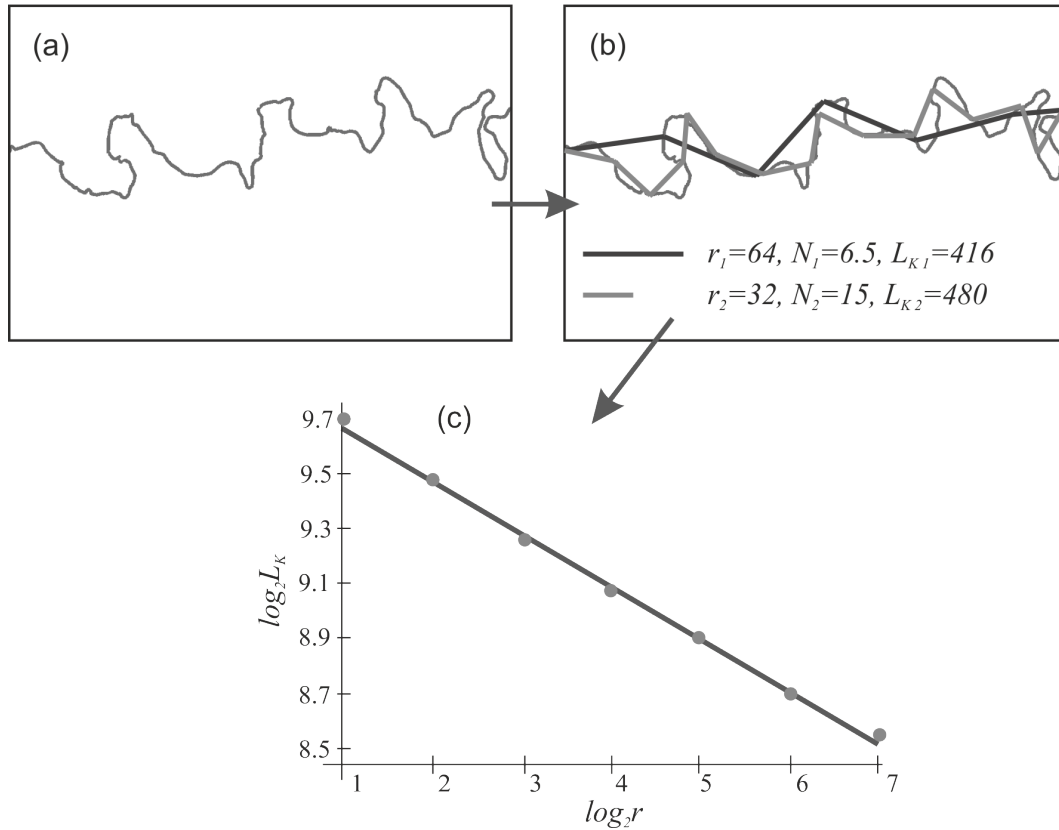
Tato práce je zaměřena na obrazová data a jejich interpretaci, proto jsou zde rozvíjeny především body b) a c).

V následujících kapitolách jsou uvedeny pouze nástroje pro odhad fraktální dimenze, které jsou použity v této práci.

4.3.1 Výpočet odhadu obvodové dimenze

Metoda je užívána k odhadu fraktální dimenze křivek, proto může být například použita pro odhad fraktální dimenze u zmíněné pobřežní linie, kap. 4.3 [2, 58–62, 64]. V této práci je metoda využita pro odhad křivek rozhraní, které jsou získány na základě obrazové analýzy z 2D snímků. Rozhraní pak je ve formě světla a stínu odraženého světelného vzoru (kap. 5.2) nebo rozhraní dvou materiálů (kap. 5.1), případně další. Pomocí této metody lze popsat také křivku profilu získanou z profiloměru (kap. 5.4).

Odhad fraktální dimenze pomocí obvodové metody je založen na výpočtu závislosti změny délky analyzované křivky rozhraní (Obr. 4.8 a) s použitou délkou kroku (Obr. 4.8 b). Zvoleným měřítkem je proměřována délka křivky rozhraní. Jak je z příkladu patrné, se zkrácením použitého měřítka r_i se prodlužuje celková délka rozhraní $L_{K i}$. (Na Obr. 4.8 je uveden příklad bez jednotek.)



Obr. 4.8 Popis křivky rozhraní (a) pomocí obvodové dimenze, (b) výpočet obvodové délky křivky L_{Ki} různými měřítka r_i , závislost změny délky křivky na délce měřítka (Richardson-Mandelbrotův graf), (c) obvodová dimenze D_C vypočtená ze stoupání [1]

Jedná se tak o fraktální strukturu, jejíž složitost lze popsat pomocí zmíněného odhadu fraktální dimenze. Protože závislost mezi $\log_2 r_i$ a $\log_2 L_K(r_i)$ je přímková, platí vztah:

$$L_K(r_i) = N(r_i) \cdot r_i = \text{konst.} \cdot r_i^{-D_C} \cdot r_i = \text{konst.} \cdot r_i^{1-D_C} \quad (4.7)$$

D_C je obvodovou dimenzí, což je odhadnutá fraktální dimenze touto metodou. Při výpočtu se vychází z odvozeného vztahu (např. v [2, 58, 61, 62]) mezi použitým měřítkem a počtem pokrytí křivky tímto měřítkem:

$$N(r_i) = \text{konst.} \cdot \left(\frac{1}{r_i}\right)^{D_C} = \text{konst.} \cdot r_i^{-D_C} \quad (4.8)$$

Úpravou vztahu (4.7) lze obvodovou dimenzi vypočítat (Obr. 4.8 c):

$$1-D_C = \frac{\Delta \log_2 L_K(r)}{\Delta \log_2 r} = s \Rightarrow D_C = 1 - s = 1 - \frac{\Delta \log_2 L_K(r)}{\Delta \log_2 r} \quad (4.9)$$

Uvedený sklon regresní přímky s představuje poměr změny druhého logaritmu délky k změně druhého logaritmu použitého měřítka. V případě spojitě křivé (jako je na Obr. 4.8), je sklon regresní přímky záporný, tedy výsledná dimenze bude vyšší než 1.

Graf na Obr. 4.8 c se nazývá Richardson-Mandelbrotův graf. Platí, že čím je hodnota D_C vyšší než hodnota topologické dimenze, tím je vyšší stupeň složitosti objektu. Změna délky se změnou měřítka je pak výraznější. Metodika používá vynásobenou obvodovou dimenzi 1 000

(označeno $D_{C\ 1000}$), aby bylo možné výsledky lépe porovnat.

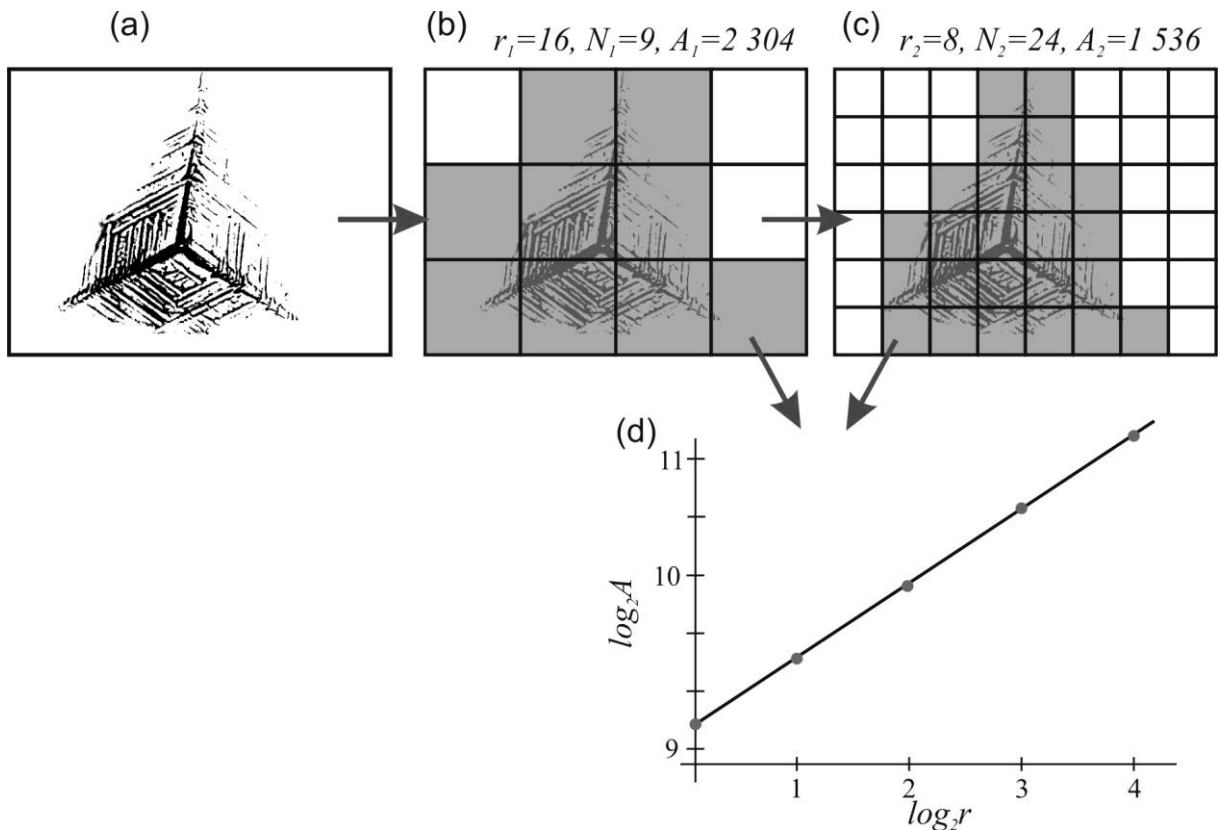
Měřítka r_i se prodlužuje až po délku pokrývající celou křivku (obvod) podle vztahu

$$r_i = b_f^i \quad (4.10)$$

kde b_f je faktor zvětšení (převážně je volen 2) a i je celé číslo $i \in [0, n_m - 1]$, n_m je počet kroků (použitých měřítek).

4.3.2 Výpočet odhadu mřížkové dimenze

Jednoduchou a univerzální metodou pro odhad fraktální dimenze je mřížková metoda (box metoda), která je v této práci použita pro popis 2D snímků. Vyšetřovaná oblast je před analýzou převedena do binárního obrazu. Mřížková metoda je založena na pokrývání mřížkou (čtverci, boxy) postupně o různé velikosti $r_{BOX\ i}$ [2, 58, 60–62, 65, 66], Obr. 4.9 b, c. V každém kroku je počítán počet boxů N_i potřebných pro pokrytí tělesa. Pro odhad fraktální dimenze je použit algoritmus, jenž stanovuje plochu potřebnou pro pokrytí objektu A_i . (Na Obr. 4.9 je uveden příklad bez jednotek.)



Obr. 4.9 Výpočet mřížkové dimenze, (a) binární snímek (samostatný krystal cristobalitu ve skle), (b, c) pokrytí obrázku mřížkou (boxy), (d) obvodová dimenze D_B vypočtená ze stoupání [1]

Za použití obdobného vztahu (4.7) je celková plocha pokrytí $A(r_{BOX i})$ boxy o straně $r_{BOX i}$ dána vztahem:

$$A(r_{BOX i}) = N(r_{BOX i}) \cdot r_{BOX i}^2 = konst. \cdot r_{BOX i}^{-D_B} \cdot r_{BOX i}^2 = konst. \cdot r_{BOX i}^{2-D_B} \quad (4.11)$$

D_B je box dimenze. Logaritmická závislost mezi plochou $\log_2 A(r_{BOX i})$ a velikostí strany $\log_2 r_{BOX i}$ je uvedena na Obr. 4.9 (d), jedná se opět o Richardson-Mandelbrotův graf.

D_B je pak získána ze sklonu regresní přímky:

$$2 - D_B = \frac{\Delta \log_2 A(r_{BOX})}{\Delta \log_2 r_{BOX}} = s \Rightarrow D_B = 2 - s = 2 - \frac{\Delta \log_2 A(r_{BOX})}{\Delta \log_2 r_{BOX}} \quad (4.12)$$

V tomto případě je pro uvedený příklad sklon regresní přímky kladný, tedy výsledná dimenze bude menší než 2 (plocha objektu se postupně zmenšuje).

Při praktickém výpočtu je vhodné začít od boxu velikosti $r_{BOX i} = 1$ pixel, která je limitní, tedy není účelné použít boxu menšího. Velikost boxu je zvětšena faktorem zvětšení b_f , podle vztahu (4.10). Velikost boxu je možné zvětšovat až po box pokrývající celý binární snímek. Vzhledem k tomu, že tento box je vždy plný (pokud se v oblasti nachází nějaká struktura), volí se konečná velikost boxu menší než celková velikost snímku.

Výsledkem je odhadnutá fraktální dimenze, tzv. mřížková dimenze (box dimenze) D_B , která byla přepočtena na 1 000 násobek tak, aby bylo možno výsledky lépe porovnávat (je označovaná jako $D_{B 1000}$).

Uvedenou metodu lze také modifikovat. Existují také metody odhadu fraktální dimenze, které využívají šedé škály snímků, kdy stupeň šedi je brán jako výška snímané scény. Jedná se tak o objekt se třemi dimenzemi. Box metoda pro těleso ve třech dimenzích používá místo čtverců krychle pro pokrytí objektu. V tomto případě je počítán objem C_i pro jednotlivé velikosti krychlí o hraně $r_{BOX i}$. Za použití vztahu (4.7) lze psát:

$$C(r_{BOX i}) = N(r_{BOX i}) \cdot r_{BOX i}^3 = konst. \cdot r_{BOX i}^{3-D_B} \quad (4.13)$$

V této práci byl pro odhad fraktální dimenze 2D snímků použit software HarFa 5.2 [67] a v práci [1, 2] software Benoit [68].

4.4 Možnosti interpretace obrazových dat pro získání 3D informace

Problematikou, která je v současné době vysoce aktuální, je interpretace dat za účelem získání informací o třírozměrném prostorovém uspořádání (3D informace). Využití informací o 3D uspořádání sledované (technologické) scény je pro rozpoznání 3D předmětů (pro třídění, následnou manipulaci, např. bin picking a montáž, zajištění bezpečnosti, navigaci), získání 3D virtuálního modelu snímaného objektu, hodnocení jakosti (rozměrové přesnosti, kontrola povrchu) a obecně v průmyslové a servisní robotice. Některé z metod vycházejí z rozpoznávání 3D uspořádání člověka, který využívá spojování obrazu ze dvou pohledů (očí, tzv. stereo vidění), stínů, pozorování těles při pohybu, obecné předběžné znalosti světa atd.

Přestože v předchozí kapitole (kap. 3) již byly popsány principy získání obrazových dat, je nutné se u některých metod interpretace nejprve zmínit o získání 3D obrazových dat (získání takovýchto dat je specifické a zmínění v kontextu této kapitoly logické). Následně je popsáno několik možností pro získání dat a pro interpretaci informací o 3D uspořádání sledované (technologické) scény. V tomto případě není možné rozdělení zobecnit na zmíněné použití energií pro získání obrazových dat, protože například již u elektromagnetického záření dochází k různým iteracím s hmotou pro různé vlnové délky, kap. 3.1.5. Pokud je využíváno odrazu záření, pak tento princip nejde použít pro záření s vysokou energií, která často hmotou objektu projdou (rentgenové a gama záření). Jedná se tak převážně o metody využívající optického záření, a to především VIS. Na druhou stranu princip „tomografie“ lze využít pro širokou škálu dříve uvedených energií (kap. 4.4.12). V textu je dále uveden i potenciál využití pro popis objektů s transparentním nebo lesklým povrchem.

Rozdělení metod získání dat pro následnou interpretaci je možné z několika hledisek. Prvním z nich může být hledisko pohybu zařízení nebo objektu (scén) na metody:

- dynamické s aktivním pohybem (získání více snímků):
 - snímače,
 - zdroje energie (především osvětlení)
 - snímače se zdrojem energie,
 - objektu (scény),
- statické (bez pohybu):
 - získání jednoho snímku
 - získání dvou a více snímků.

V práci [5] je rozdělení provedeno podle [69] a je opět děleno na aktivní a pasivní. V případě aktivního je do snímané scény přidána dodatečná veličina (nejčastěji paprsek použité energie pro snímání). Pasivní metody jsou takové, ve kterých je scéna sejmuta bez dodatečně přidávané veličiny. Toto rozdělení je v této práci uplatněno u triangulačních metod.

Další možností, uvedenou v [70], je rozdělení podle principu snímače pro primární získání dat na:

- bodové měření,
- profilové měření,
- plošné měření.

V této práci bude rozdělení provedeno na základě základních přístupů – metod, které jsou dále děleny, například podle [71]. Metody můžeme dělit na:

- **triangulační metody:**
 - aktivní triangulace (z hlediska aktivního, tedy přídavného zdroje energie, u VIS osvětlení):
 - 1D triangulace (bodový laser, kap. 4.4.1.1),
 - 2D triangulace (liniový laser, kap. 4.4.1.2),
 - 3D triangulace (struktuovaný svazek, kap. 4.4.1.3): technika Moiré, technika světelného vzoru, technika barevného vzoru, technika fázového posuvu,
 - pasivní triangulace (bez přídavného zdroje energie – osvětlení):
 - pomocí jednoho 2D snímače a jednoho snímku (metoda měření tvaru pomocí textur, kap. 4.4.2.1),
 - ze dvou a více 2D snímačů (stereo vidění, kap. 4.4.2.3),
 - z jednoho 2D snímače ve více polohách, kap. 4.4.2.4,
 - měřicí systémy s teodolitem (pouze bodově, kap. 4.4.4),
 - fokusovací techniky (několik snímků),
 - techniky "podoba ze stínování" a fotometrické stereo (jeden nebo více snímků, kap. 4.4.5 a kap. 4.4.6),
 - tvar z obrysu (kontury, kap. 4.4.7.),
- **rastru vzniklého z bodových snímačů:**
 - měření vzdálenosti založené na měření času návratu odražející se energie od sledovaných objektů:
 - modulovaného laserového paprsku elektromagnetického záření (Time of Flight, ToF, kap. 4.4.10),
 - zvukového mechanického vlnění (ultrazvuk, kap. 3.4),
 - měření vlnové délky odražené monochromatické složky, která odpovídá dané vzdálenosti (konfokální snímače, kap. 3.1.7.5),
 - získání vzdálenosti z triangulace bodového laseru (1D triangulace, kap. 4.4.1.1),
- **optická interferometrie** (kap. 4.4.9),
- **tomografie**, (kap. 4.4.12).

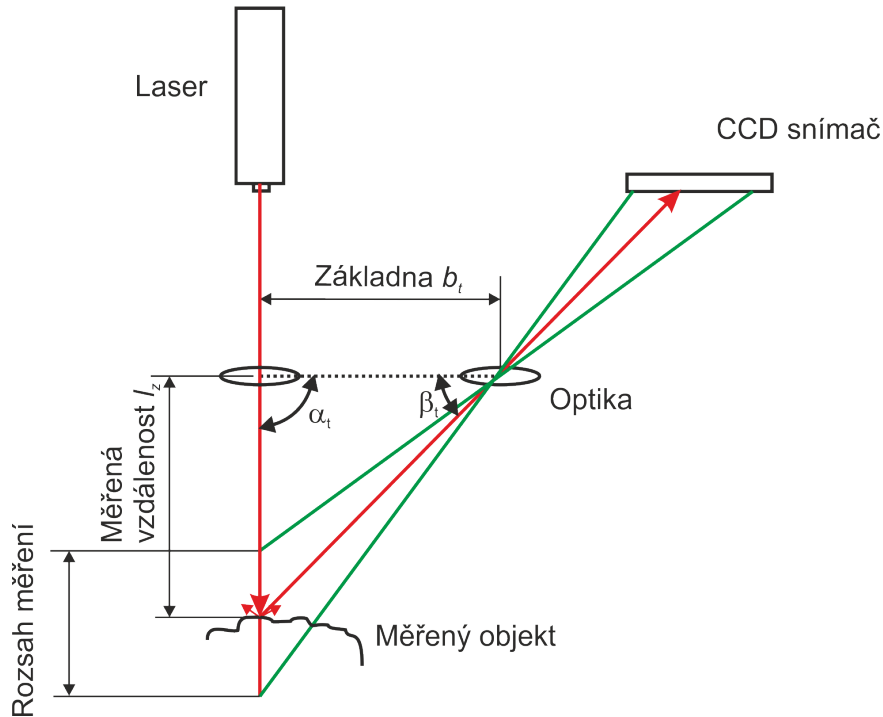
4.4.1 Aktivní triangulace

Aktivní metody triangulace představují „aktivní“ nasvícení objektu vnějším zdrojem detekované energie, nejčastěji elektromagnetického záření.

4.4.1.1 1D triangulace

1D triangulace je používána pro měření vzdálenosti pomocí bodového laserového triangulačního snímače. Princip triangulace je uveden na Obr. 4.10. Zdroj světla (bodový laserový paprsek) spolu se snímačem a osvětleným bodem na zkoumaném objektu tvoří takzvaný triangulační trojúhelník. Spojnice mezi světelným zdrojem a snímačem je

základnou, která je také nazývána triangulační bází b_t . Na straně světelného zdroje je úhel svíraný triangulační bází konstantní (α_t), kdežto na straně snímače je úhel určen proměnnou pozicí osvětleného bodu na CCD snímáči (β_t).



Obr. 4.10 Triangulační trojúhelník u 1D triangulace pro laserový snímač

Z velikostí úhlů lze na základě znalosti triangulační báze spočítat měřenou vzdálenost bodu na povrchu objektu l_z [mm] (na základě pravidla součtu vnitřních úhlů, sinusové věty a goniometrických funkcí):

$$l_z = \frac{b_t \cdot \sin \beta_t \cdot \sin \alpha_t}{\sin(180^\circ - (\alpha_t + \beta_t))} \quad (4.14)$$

kde úhel β_t je vypočten podle:

$$\beta_t = \arctg\left(\frac{\frac{v_s \text{ mm}}{2} - b_v \text{ mm}}{f}\right) + 90^\circ \quad (4.15)$$

f je ohnisková vzdálenost objektivu v mm, $v_s \text{ mm}$ je šířka snímače v mm, $b_v \text{ mm}$ vzdálenost projekce bodu na čipu v mm, kterou lze spočítat podle vzorce:

$$b_v \text{ mm} = \frac{v_s \text{ mm}}{v_s \text{ pixely}} \cdot b_v \quad (4.16)$$

kde $v_s \text{ pixel}$ je šířka čipu v pixelech a b_v je vzdálenost projekce bodu na snímku v pixelech v ose v .

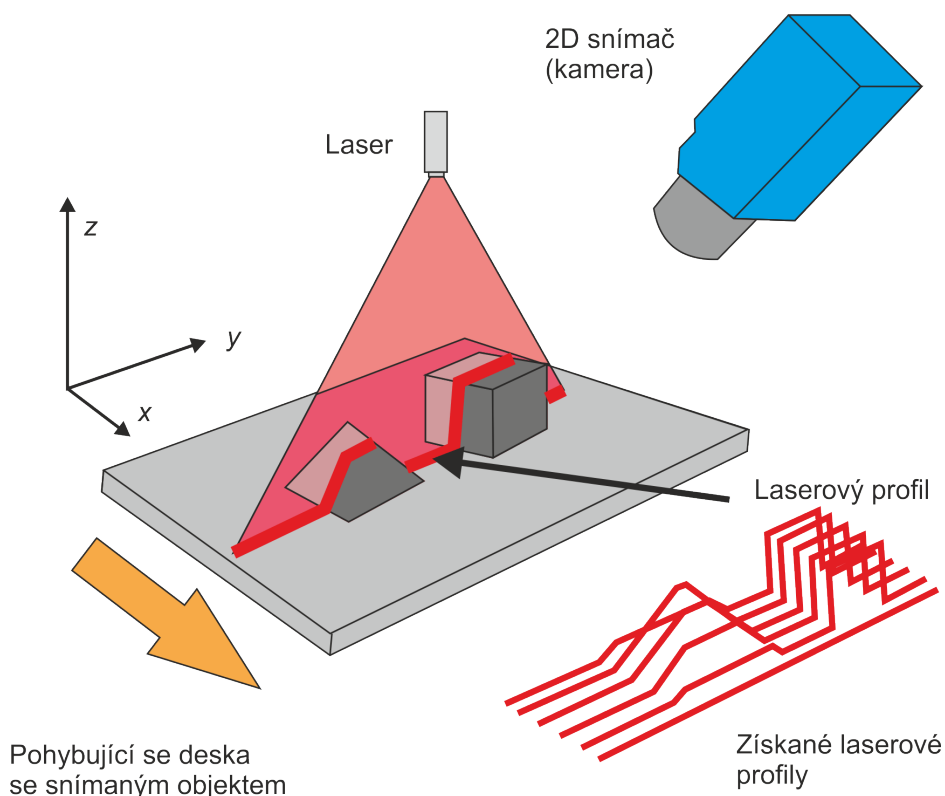
Jedná se o nejběžnější a nejdostupnější zařízení s využitím triangulace. Snímače mají přesnost uváděnou v řádech μm (většinou v desítkách μm pro běžné rozsahy), vysokou frekvenci snímání v řádech kHz a širokou škálu rozsahů (od milimetrů po metry).

Pro získání rastované 3D informace o sledovaném povrchu objektu je nutné získat vhodné body buď pomocí definovaného pohybu objektu v osách x a y , nebo samotného

snímače, případně vytvořit rastr bodových měření. Možná je také kombinace přístupů, kdy rastr v linii (několik bodových snímačů) např. v ose x se pohybuje nad objektem ve směru osy y .

4.4.1.2 2D triangulace

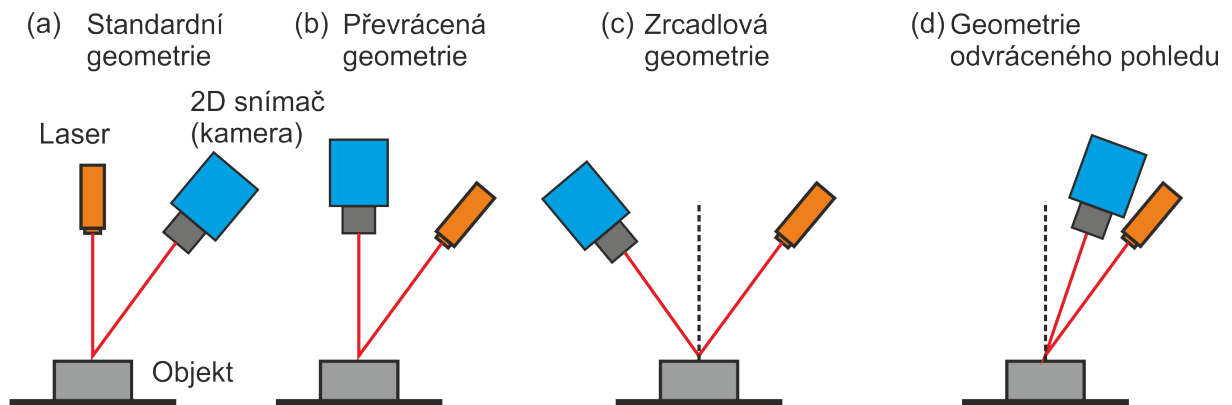
Aktivní 2D triangulace je v současné době v průmyslové praxi asi nejčastějším způsobem získání 3D virtuálního modelu. Využívá se promítání laserového paprsku ve formě linie při definovaném (přesně načítaném) pohybu objektu nebo kamery s laserem. Jedná se o 2D triangulaci, což jsou profilové laserové skenery, které jsou založeny na generaci profilů, Obr. 4.11. Zařízení nejčastěji funguje ve spektru VIS s možností přesahu do UV a IR. 3D obraz je poté složen z takto nasnímaných profilů, které definují samostatně rozměr v ose y a z . Objekt nebo kamera se musí pohybovat ve směru osy x a pohyb musí být svázán s pořizováním jednotlivých snímků. Jedná se tedy o propojení obrazových dat s daty enkodéru nebo jiného snímače polohy.



Obr. 4.11 Princip triangulačních 3D laserových skenerů s 2D triangulací [72]

Existují v podstatě čtyři základní možnosti uspořádání laseru a kamery, Obr. 4.12, např. podle [73]. Standardní geometrie představuje liniový laser promítaný kolmo na sledovaný objekt (k ploše v ose x a y) a 2D snímač (kamera) je umístěný pod definovaným úhlem. Charakteristické je pro tuto geometrii, že výškové rozdíly objektu podél promítané linie nevytváří změnu v ose y , což zjednodušuje výpočty potřebné k získání tvaru objektu. Systém je tak jednodušší, přesnější a rychlejší s jednodušší kalibrací. Nevýhodou může být, že 2D snímač sleduje objekt z úhlu, což zvyšuje nárok na požadovanou hloubku ostrosti použité kamery. Se zvětšením úhlu kamery vůči laseru (menší sledovací úhel) roste výškové rozlišení,

ale zvětšuje se zároveň pravděpodobnost vzniku slepých míst (míst, která nejsou díky poloze objektu a jeho tvaru 2D snímačem vidět). Tato konfigurace je používána pro většinu aplikací.



Obr. 4.12 Uspořádání systému pro 2D triangulaci [G28]

Převrácená geometrie, kdy je kamera kolmo na rovinu os x a y , nabízí zvětšené výškové rozlišení než standardní geometrie, šikmý úhel laserového osvětlení způsobí větší posunutí laserové linie při změně výšky objektu. Kamera je ke sledované ploše umístěna svisle, proto se v tomto případě nevyskytují žádná slepá místa. Nicméně, při použití převrácené geometrie způsobuje změna výšky objektu změnu v obou osách, což vede k náročnější interpretaci dat.

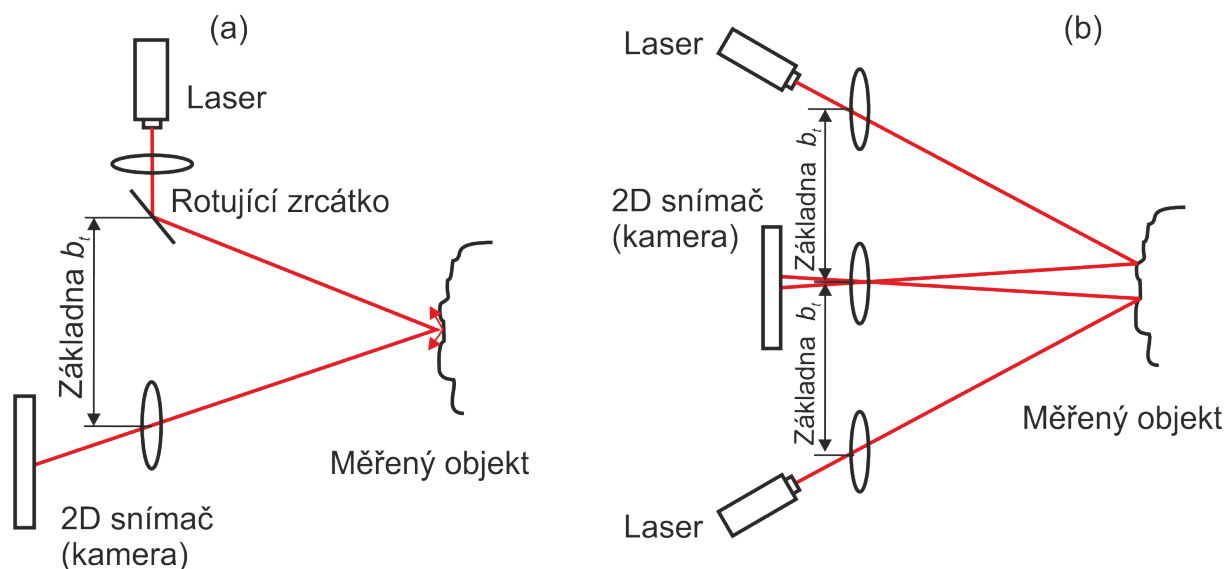
Zrcadlová geometrie se vyznačuje stejným úhlem (jiným než normála k povrchu) kamery a laserového projektoru. Toto dvakrát šikmé uspořádání nabízí lepší detekci linie a vyšší rozlišení než oba předchozí zmiňované způsoby. Uspořádání umožňuje kameře snímat zrcadlový odraz, nebo téměř zrcadlový odraz laseru, což způsobuje vyšší reflexi, kterou lze využít ke zvýšení úrovně signálu od tmavých objektů. Tmavé objekty odrážejí méně světla a tím vytvářejí nižší úroveň měřicího signálu – jinými slovy, detektor má méně světla pro měření. To může zároveň způsobit chyby měření, pokud tyto reflexe způsobí saturaci nebo blooming detektoru. Šikmé umístění kamery opět vede k možným slepým místům rekonstruovaného objektu.

Při geometrii odvráceného pohledu jsou kamera i laserový projektor šikmo ke snímanému objektu, ale na stejné straně normály k povrchu objektu. To dramaticky snižuje šanci zrcadlových reflexí, pokud objekt nemá extrémní texturu nebo strukturu na povrchu. Toto uspořádání zároveň snižuje možné výškové rozlišení, protože 2D snímač je v podobném umístění jako laserový projektor. Toto uspořádání může vést ke vzniku slepých míst.

Jakékoliv další kombinace 2D snímače a liniového laseru jsou kombinací výše uvedených možností.

Vedle pohybu objektu nebo optického systému (kamera a laser) existují i další možnosti. Pohyb paprsku může být zajištěn např. přes zrcátko, Obr. 4.13 (a). Tento princip využívá například použitý snímač v kap. 6.7.1.3 Sick Ruler se systémem PLB. Zařízení musí umět přesně snímat polohu zrcátka. Další možností je využití dvou laserových linií, Obr. 4.13

(b), což vede ke zlepšení detekce míst, která by byla ve stínu laserového paprsku při běžném uspořádání [74]. Obecně je také možné využít ostrého rozhraní záření a stínu, případně i rozhraní záření dvou rozdílných vlnových délek.



Obr. 4.13 Systém laserové triangulace se zrcátkem (a) a systém se dvěma liniovými lasery (b)

Snímače založené na 1D a 2D triangulaci využívají především červeného laserového paprsku (s vlnovou délkou okolo 650 nm), který je výhodný především s ohledem na použití CCD nebo CMOS APS snímač odraženého paprsku (snímač má vyšší citlivost ve vyšších vlnových délkách). Existují také varianty s modrým, případně fialovým laserem (s vlnovou délkou okolo 450 nm, respektive 405 nm), které mají lepší výsledky při měření na kovech, zejména žhavých a organických materiálech jako dřevo, kůže, potraviny, dýhy atd. Na rozdíl od červeného laseru neproniká snížená vlnová délka modrého laseru do měřeného objektu. Modrý a fialový laser vytváří minimální laserový bod na povrchu měřeného objektu, což zaručuje stabilní a přesné výsledky měření na jinak obtížných površích. V práci [G28, 5] je uvedena aplikace fialového laseru na detekci folie vyrobené z materiálu s podpovrchovým rozptylem světla. Existují systémy s monochromatickými lasery s vlnovou délkou odpovídající zelené, žluté a oranžové barvě.

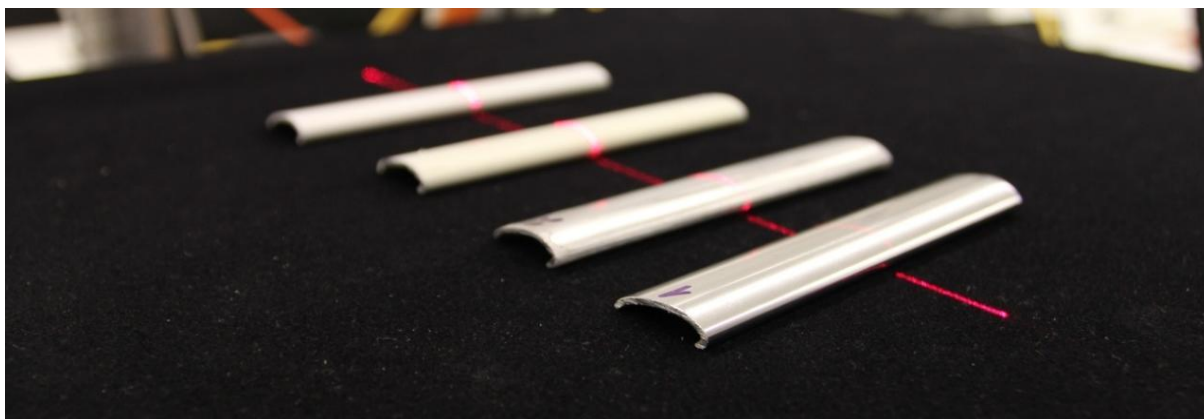
K výhodám triangulační metody patří nízká závislost na okolním osvětlení (při detekci objektů s difúzním povrchem), vysoká přesnost měření a vysoká rychlost pohybu snímaného objektu. Tento typ kamer je používán hojně ve strojírenství, potravinářství, ale i v archeologii a dalších oblastech, především se používá na malé vzdálenosti a relativně malé předměty (běžně od desítek až po tisíce mm). Popsané standardní metody získání 3D obrazu jsou ovšem založené na detekci bodu, profilu nebo světelné struktury, které se odráží od povrchu sledovaného objektu. Ideálně jsou tak detekovatelné objekty s difúzně-odrazivým povrchem. Pro zrcadlové nebo lesklé povrchy jsou metody mnohem komplikovanější a pro transparentní materiály již popsané metody nelze bez úprav povrchu použít.

V rámci bakalářské práce [7], realizované na Katedře sklářských strojů a robotiky TUL

pod vedením autora této práce, byly realizovány experimenty k prezentaci vlivu povrchu na detekci 3D objektů pomocí 2D triangulace. Povrch objektu byl od difúzního až po skoro zrcadlový. Testovány byly designové lišty automobilových skel, které lemují boční autoskla. Experimenty byly provedeny pro čtyři vzorky oddělených kusů lišt délky 100 mm. Jejich povrch měl následující vlastnosti:

- vzorek č. 1 – originální chrom,
- vzorek č. 2 – povrch upraven – zmatněn brusným papírem,
- vzorek č. 3 – nástřik matnou bílou barvou,
- vzorek č. 4 – nástřik lesklou bílou barvou.

Vzorky lišt jsou zobrazené na Obr. 4.14. Snímání bylo prováděno při standardní geometrii uspořádání kamery a laseru (Obr. 4.12 (a)). Umístění kamery s laserem do výšky 520 mm, vzdálenost základny 250 mm, úhel naklonění kamery vůči normále 26°. Použitá kamera SICK Ranger E55 osazená snímačem M12 Smart Vision Series, použitý laser Edmund optics s liniovým paprskem o 660 nm a výkonu 35 mW a vyzařovacím úhlem 30°, enkodér SICK DFS60B.

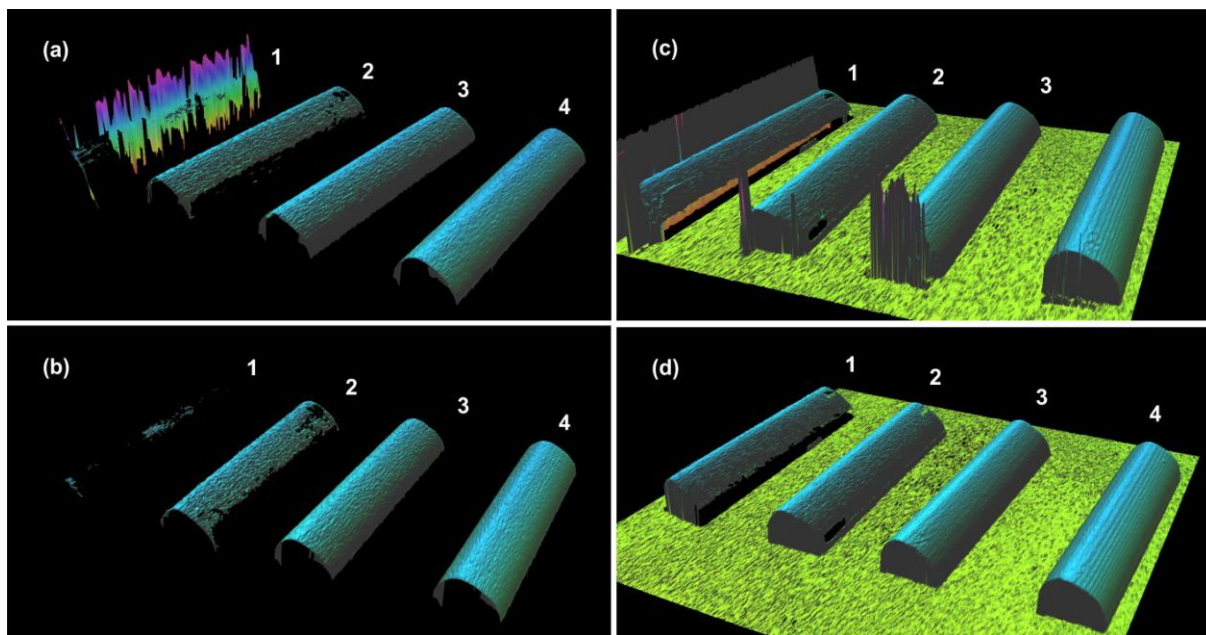


Obr. 4.14 Vzorky lišt s liniovým laserem, [7]

Při experimentu byla sledována závislost nastavení parametru doby expozice (300 až 5 000 μ s) a osvětlení, kdy byla testována detekce při osvětlení temné laboratoře běžnými průmyslovými zářivkami (14 \times 80 W, na ploše 46 m², výška místnosti 2,7 m, bílý difúzní povrch stěn) a při úplném zastínění. Ostatní parametry byly stále shodné (zesílení signálu, clona,...). Všechny čtyři vzorky byly snímány současně a vyhodnocovala se schopnost detekovat povrch – získání relevantních obrazových dat. Sledovanými parametry byla celistvost nasnímaného objektu a minimum rušivých vlivů, výsledky jsou na Obr. 4.15.

Z výsledků je patrné, že software pro získání obrazových dat nedokáže správně reprezentovat 3D obraz u lesklých objektů při okolním osvětlení. Odraz okolních zdrojů na povrchu lesklého až zrcadlového povrchu způsobuje chybnou detekci obrazových dat. S delší dobou expozice se v tomto případě odlesky projeví jako linie. Na okrajích vzorků lišt se také při okolním osvětlení objevují odlesky, které jsou způsobeny strukturou řezu po jejich dělení. Jak se v tomto případě ukázalo, tak vliv lesklé a matné barvy na povrchu byl minimální. Matný hliníkový povrch vykazoval lepší výsledky než lesklý chromovaný. Při zajištění úplného stínění od okolního prostředí a při dostatečně dlouhé době expozice, je možné touto

metodou snímat i tento tvar výrobku v lesklém až zrcadlovém provedení. Prokazuje se tak nutnost umět při aplikacích zajistit dostatečně vhodné podmínky omezení okolního zdroje elektromagnetického záření ve vlnových délkách citlivosti kamery.



Obr. 4.15 Obrazová data nasnímaných lišt s různými povrchy: (1) lesklý chrom, (2) zmatněný hliníkový povrch, (3) nástřik matnou bílou barvou, (4) nástřik lesklou bílou barvou; (a) doba expozice 300 μ s při osvětlení v laboratoři; (b) doba expozice 300 μ s v zatemněné laboratoři; (c) doba expozice 5 000 μ s při osvětlení v laboratoři; (d) doba expozice 5 000 μ s v zatemněné laboratoři, [7]

V této práci byly testovány možnosti detekce tvaru těchto lišt. Experimentálně bylo zjištěno, že lze snímat originální chromovanou lištu při zajištění nulového vnějšího okolního osvětlení, kdy nedochází k chybnému vyhodnocení odraženého světla. Při aplikaci v provozu se počítá s vyhodnocovacím algoritmem, který odstraní zjevné chyby snímání, jako jsou výchyly laseru či sejmutí podložky. Obrazová data by bylo možné také zlepšit změnou geometrie uspořádání: 2D snímač-laser, Obr. 4.12.

Vedle uvedeného problému s lesklým povrchem je třeba zmínit další omezení. Tím je především samotný tvar sledovaného objektu. Již výše byla zmíněna podmínka viditelnosti laserového bodu, paprsku nebo mřížky na povrchu sledovaného objektu kamerou (v částech, kde si objekt sám stíní, není laser zobrazen). Zřejmým problémem bude také snímání objektů z transparentních materiálů, které bez úprav povrchu nelze snímat. Tento problém je platný pro všechny metody aktivní triangulace (aktivního osvětlení). Problematika je komentována v kap. 4.4.1.4.

Samotné rozlišení a přesnost metod závisí na měřené vzdálenosti, velikosti základny, úhlech laseru a kamery, rozlišení kamery, ohniskové vzdálenosti a pohybu objektu nebo kamery s laserem.

Aktivní 2D triangulace je použito pro detekci objektů s lesklým povrchem, kap. 6.7.1.3.

4.4.1.3 3D triangulace

Aktivní 3D triangulace používá převážně strukturovaný 2D svazek optického záření, promítaný jako vzor na objekt. Existuje několik přístupů.

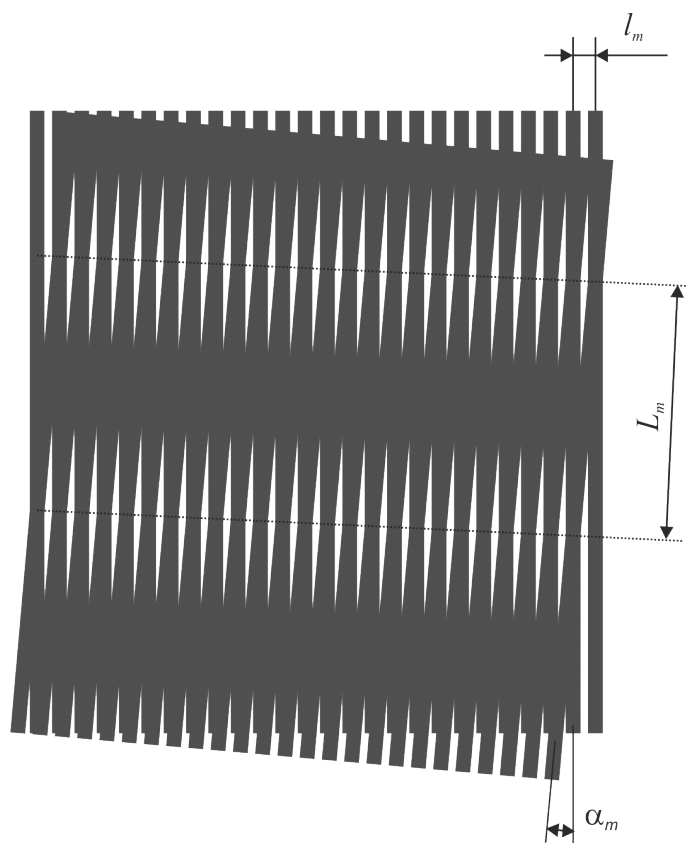
Technika světelného vzoru je založena na promítání definovaného vzoru na povrch sledovaného objektu (scény) a jeho odrazu, který slouží k definici rozměrů objektu (scény) v ose z. Pro promítání struktury je používáno různých typů projektorů promítajících rastry a vzory, od laserových (s koherentním zářením) přes různé typy „zebra-desek“ s rozhraním bílého světla a stínu až po barevné kódy (pomocí světla o různých vlnových délkách). Promítaný vzor může obsahovat různé pomocné značky nebo také pomocný kód, sloužící k pozdější jednodušší identifikaci jednotlivých polí mřížky. Sledovaný objekt původně pravidelný vzor deformuje a z této deformace lze za určitých podmínek vypočítat rozměry v ose z. Existuje velké množství vzorů od proužků, přes čtverce, kosočtverce, až po velmi složité tvary [75]. Pro volbu typu mřížky je zásadní co nejvyšší jednoznačnost, aby bylo možno v každém bodě přesně určit, kde se právě deformovaný vzor nachází. Proto je často používáno i některé z forem kódování [76]. Pro nejjednodušší případy je potřeba použít více snímků (je promítnuto více vzorů), pak je kódování prováděno pomocí pruhů (binární kódování), kódů ve stupních šedi – šedotónové (gray code), fázově posunuté kódování (phase shift code, což je níže zmíněná metoda furierovské profilometrie) a hybridní. Barevné kódování je realizováno promítnutím barevných přechodů ve VIS na sledovaný objekt (níže uvedená metoda vícebarevného osvětlení předmětu). Barevný přechod může být jednoduší – od fialové po červenou (rainbow 3D camera) nebo se může opakovat s určitou frekvencí (continuously varying colour code). Pro tento typ osvětlení stačí teoreticky pouze jeden snímek k získání 3D modelu. Dále se může jednat o kódování pomocí proužkového kódování, kdy jsou používány barevné proužky v definovaném pořadí s různou vlnovou délkou, může se dále jednat o šedotónové uspořádání a segmentované proužky (různé délky). Opět v těchto případech teoreticky stačí pro získání 3D modelu jeden snímek. Dalšími možnostmi pro získání 3D modelu z jednoho snímku je mřížkové kódování s pseudonáhodným binárním polem (Pseudo-random Binary Array – PRBA), mini-vzory jako kódová slova pro indexování mřížky (Mini-patterns Used as Code Words), barevně kódované mřížky (Colour-Coded Grids) a 2D pole barevných bodů (2D Array of Colour-Coded Dots).

Výhodou techniky světelného vzoru je nízká cena potřebného zařízení, která je ovšem na úkor rozlišovací schopnosti. Přesnost detekce závisí nejen na přesnosti snímací kamery, ale také na hustotě a kontrastu promítané mřížky. Tato metoda je v průmyslové praxi využívána často, ale má své omezení, které se vztahuje mimo jiné na vlastnosti povrchu sledovaného objektu a scény (umožňující zobrazení – pokud možno difúzní odraz vzoru od povrchu). Touto problematikou se zabývala například tato práce [77]. Tento princip také využívala např. komerčně prodávaná první verze snímače Kinect od firmy Microsoft. Projekce komplikovaného vzoru byla v NIR oblasti a snímání probíhalo pomocí NIR kamery. Techniky světelného vzoru je využíváno pro detekci zvlnění plochého skla, tzv. corrugation test, bez přepočtu na 3D, kap. 5.2. Další potenciální využití je u detekce bortů, kap. 6.6.1.

Technika Moiré je založena na principu projekce dvou pravidelných struktur na měřený povrch. Pravidelnou strukturou mohou být liniové nebo radiální mřížky, matice bodů apod. Obecně koincidence těchto dvou struktur vyvolá vznik třetí struktury pozorovatelné na povrchu měřeného objektu [70, 78]. Jedná se o superpozici dvou mřížek s mřížkovou konstantou l_m [mm]. Pokud jsou projektovány mřížky paralelně na sebe, nedochází ke vzniku dalších struktur, ale při natočení jedné z nich nebo obou vůči sobě o úhel α_m , vznikne další struktura s periodou L_m [mm] (Obr. 4.16):

$$L_m = \frac{l_m}{2\sin(\alpha_m/2)} \quad (4.17)$$

Pro malé úhly α_m je $L_m = l_m/\alpha_m$. Pokud promítneme jednu z mřížek na zkoumaný povrch, dojde vlivem tvaru povrchu k deformaci této mřížky. Po superpozici s druhou mřížkou, která bude nedeformovaná (referenční), dojde ke generaci moiré proužků. Tyto proužky budou mít jiné uspořádání než původní (liniové jako je na Obr. 4.16) a jejich pozice se bude měnit se vzdáleností objektu od zdroje záření a 2D snímače. Výsledným efektem může být vznik obdoby vrstevnic na povrchu sledovaného objektu.



Obr. 4.16 Vznik moiré proužků: l_m , L_m jsou periody mřížek, α_m je úhel natočení jedné z mřížek

Citlivost měření Moiré techniky se dá zvětšit pomocí metody „fázového posunutí“ (phase shifting), kdy se posouvá fáze projektované mřížky a také hustoty mřížky. Metoda je ovšem náročnější na získání potřebných dat, neboť je nutné extrahovat z výsledného obrazu Moiré proužky, jejichž detekce je velice obtížná. Jistou výhodou je počítačové zpracování, kdy se nejprve nasnímá referenční mřížka, vypočítá se její frekvence a fáze v obraze. Poté se

nasnímá obraz projektované mřížky, zpracuje se obdobně a výsledek se sečte v počítači. Tato metoda se nazývá „projekční moiré“. Obdobně se postupuje při použití modifikace této metody tzv. „dvou-projektorová moiré“ (double projection moiré). Struktury se projektují ze dvou směrů, případně dvou projektorů. Další možností je umístění mřížky před zkoumaný povrch, kdy procházející světlo je přes ni projektováno na povrch objektu. Odraz je snímán 2D snímačem přes tutéž mřížku. Tato metoda je nazývána „stínování moiré“ (shadow moiré) [70].

Fourierovská profilometrie (nazývaná též F-topografie) je podobně jako technika Moiré založená na měření fázového rozdílu periodické struktury promítané na zkoumaný objekt a referenční rovinu. Rozdíl fází těchto struktur v měřených bodech charakterizuje jejich výškové rozložení [70]. Metoda je založená na snímání periodické struktury projektované na povrch měřeného objektu a porovnání s tvarem téže struktury zaznamenané na referenčním objektu. Pokud je tato struktura se sinusovým průběhem intenzity dopadajícího světla promítnuta na rovinu rovnoběžnou s rovinou projektoru (což je často), je na 2D snímači také detekován periodický průběh intenzity (sinusový průběh je ale zatížen šumem). Při promítnutí této struktury na sledovaný objekt (scénu), kde povrchy nejsou rovinné a rovnoběžné s rovinou projektoru, dojde k deformaci této struktury (zahuštění nebo zředění promítnuté struktury v závislosti na výškovém profilu objektu – scény). Detekována je tak změna fáze v některých bodech, která je použitelná pro získání informace o výchylce v těchto bodech.

Důležitá je pro tuto metodu opět kvalita povrchu objektu (scény), která by měla být ideálně difúzně-odrazivá. Důležitá je také volba periodické struktury a projektoru. Jako optimální se ukazuje mřížka se sinusovým průběhem intenzity (kvůli pozdější filtraci). S ohledem na tvar povrchu a typ aplikace je důležitá volba periody mřížky. Je rovněž vhodné nastavit vysokou hodnotu kontrastu pro filtraci šumu a morfologické operace. Na rozdíl od Moiré techniky nebo 2D triangulace je tato metoda jednoduchá z pohledu experimentálního vybavení, k výpočtu teoreticky postačuje pouze jediný snímek. Nevýhodou je složitější algoritmus výpočtu a fakt, že lze počítat s body, jejichž rozdíl topografických výchylek je konstantní.

Další z metod používaných pro rekonstrukci 3D objektů je již zmíněná **metoda vícebarevného osvětlení předmětu**, nazývaná taktéž technika barevného kódu. Předmět je zde nasvícen přesně definovaným spojitým barevným přechodem, takzvanou duhou. Strany předmětu kolmé ke zdroji osvětlení mají světlejší barvu než strany odkloněné. Tedy čím více je stěna odkloněna od kolmé roviny, tím tmavší odstín odráží. Pro tento způsob rekonstrukce je nutné použít speciální projektor, který je schopný takto nasvítit požadovaný předmět, a také vhodnou snímací kameru. Mezi výhody této metody patří schopnost výpočtu tvaru 3D modelu v reálném čase, zásadní nevýhodou je ovšem přesnost, neboť výsledkem je pouze orientační tvar předmětu.

4.4.1.4 Použitelnost aktivní triangulace

Veškeré uvedené metody s aktivním osvětlením mají své limity, a to:

- v možnostech detekovaného tvaru objektů,
- v materiálu a povrchových vlastnostech detekovaných objektů a scény při interakci s použitou energií.

Tvar objektů je limitní pro komplikované objekty a objekty s nevhodnou geometrií. Pro získání dat pro následnou interpretaci vedoucí k získání 3D modelu je třeba zajistit, aby energie (nejčastěji elektromagnetické záření v oblasti VIS) dopadala na povrch objektu (nedocházelo ke stínění nejčastěji vlastními částmi objektu) a zároveň byl odraz viditelný pro snímač. Problémem pak jsou konkávní části objektu, plochy kolmé a pod větším úhlem než 90° na obrazovou rovinu, plochy rovnoběžné ke zdroji záření. Obecně platí, že lze získat pouze povrchové části objektu. Možností je dále zajištění následného snímání se změněnou geometrií: objekt – zdroj záření – snímač (např. otočení objektu na rotační podložce). Princip je používán především u 3D triangulace a u stereo vidění (pasivní triangulace). Problematické jsou také objekty s příliš členitým povrchem, kde členitost neodpovídá hustotě projektovaných vzorů.

V případě elektromagnetického záření je nutné zajistit difúzní odraz tohoto záření od povrchu. V případě jiného odrazu je snímání buď komplikované nebo nemožné. Pokud je povrch lesklý, pak je nutné provést optimální nastavení geometrie mezi snímačem, zdrojem záření (osvětlením) a objektem. Dále je třeba minimalizovat vliv okolního záření (jak vyplývá z uvedeného příkladu pro 2D triangulaci v této podkapitole). Následně bude také nutné provést morfologické operace se získanými obrazovými daty. Podobně je nutné se zachovat v případě objektů, které mají značně odlišný charakter povrchu, např. střídání lesklejších a matnějších ploch. Problémem může být také různobarevnost objektů. V práci [77] jsou zmíněny materiály pro aktivní triangulaci:

- zcela vhodné: dřevo, papír, kůže,
- vhodné dle barvy a hrubosti: plast, silikon, guma, kov, keramika, mramor,
- nevhodné: zrcadlo, sklo, transparentní plasty, molitan.

Zřejmým problémem je tedy také snímání objektů z transparentních materiálů. Těmito metodami nelze bez úprav povrchu objekty snímat. Často je řešen problém nanesením křídového prášku (většinou ve spreji – antireflexní postřik) na povrch objektu, který se tak stane z části neprůhledný a difúzní. Prášek musí být následně odstraněn, takže je tento postup jen obtížně použitelný pro opakovanou kontrolu v sériové a hromadné výrobě. Možností je u transparentních materiálů s odrazivým povrchem, jako je sklo, využít odrazu laserového paprsku promítnutého na projekční desku, kap. 6.1 a [5].

Pro zvýšení přesnosti a spolehlivosti metody se využívá více snímků získaných při otáčení objektu, za použití více zdrojů záření, které jsou postupně zapínány, promítání více vzorů a také lze využít přístupu senzorové fúze (multisenzoriky), kap. 4.4.3.

4.4.2 Pasivní triangulace

Pasivní metody triangulace znamenají využití okolního odraženého elektromagnetického záření od sledovaného objektu (nebo celé scény) nejčastěji v oblasti VIS. Není tedy potřeba znát geometrické uspořádání ve vztahu ke zdroji energie (osvětlení).

4.4.2.1 Pasivní triangulace pomocí jednoho 2D snímáče a jednoho snímku

Metoda měření tvaru pomocí textur využívá povrchové textury, která je již nanесena na povrch zkoumaného objektu nebo scény. Metoda je založena na analýze deformace této textury. Jestliže bude povrch rovinný a textura periodická, bude se obraz textury měnit pouze vlivem zvětšení (polohy 2D kamery a aberace). Při deformaci povrchu objektu bude deformována i textura [70]. Existuje několik přístupů pro vyhodnocení deformované textury na povrchu objektu nebo scény. Jednotlivé body textury jsou označovány jako texely (texture picture). Přístup popsany Gibsonem v [79] zkoumá relativní velikost a polohu jednotlivých texelů v obraze. Využívá se diskrétní Fourierovy transformace.

Omezení použitelnosti metody je logicky pouze na případy, kdy je již textura na povrchu objektu, např. potištěné textilie.

4.4.2.2 Pasivní triangulace pomocí jednoho 2D snímáče a více snímků v čase

Sledování známých objektů pomocí obrazových rozdílů je další možností. V práci [5] je využit přístup, který umožňuje detekci známých objektů v obraze pouze z jednoho snímku. Algoritmus je popsany v [80, 81] a je založen na znalosti rozměrů sledovaného objektu (CAD modelu), detekci hran v obraze, využití perspektivy a znalosti vnitřních parametrů kamery.

Metoda ztotožňuje virtuální 3D model předem známého objektu se snímkem reálného objektu. Následuje vpasování 3D CAD modelu a odečtení vzdálenosti mezi jednotlivými uzly. Na základě těchto vzdáleností a díky znalosti kalibrační matice lze soustavou rovnic dopočítat hodnoty vnějších parametrů kamery. Je zjevné, že robustnost metody závisí kromě zajištění stabilních okrajových podmínek také na tvaru a rozmanitosti sledovaného objektu. Obecně při ztotožňování platí, že čím více definovaných bodů a kontrastních hran, tím lépe. 3D sledování objektu jednou kamerou má své uplatnění tam, kde je uživatel limitován použitelným prostorem.

4.4.2.3 Pasivní triangulace ze dvou a více 2D snímačů

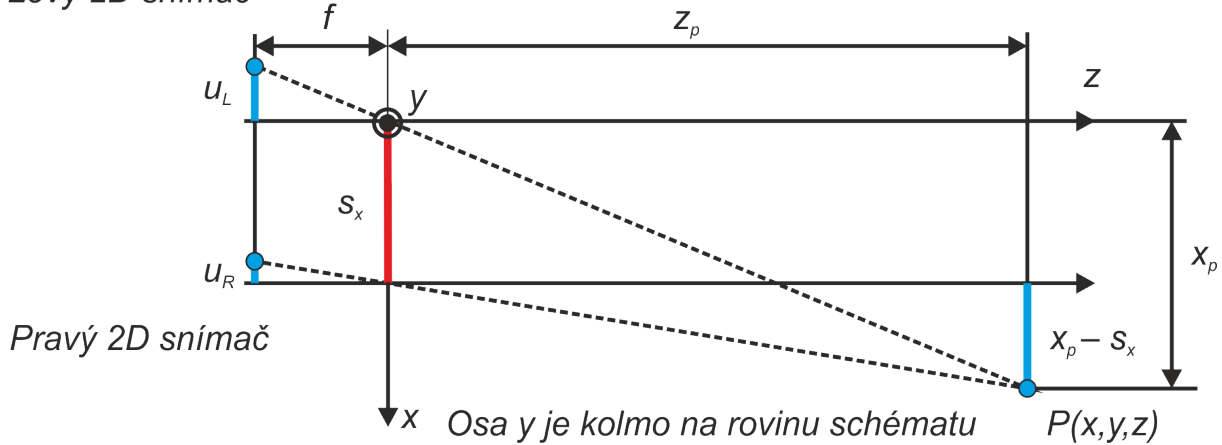
Stereo vidění (stereovize, stereovizní vidění, binokulární stereo) je metoda založená na softwarové fúzi (multisenzorice), která využívá dvou a více 2D senzorů. Metoda vychází z lidského vnímání světa pomocí zraku. Efekt prostorového vidění je umožněn schopností lidského zraku skládat v mozku dva obrazy téhož předmětu viděného z rozdílného místa. Princip metody se (mimo jiné) využívá k projekci 3D obrázků a snímků (stereoskopie). Jedná se o vytváření iluze prostoru na 2D snímku pomocí rozposunutí dvou totožných snímků v jedné ose, což je v současné době využíváno tzv. 3D televizemi a 3D kinem [70] (dříve to byl stereoskop).

Metoda stereo vidění je založena na pořízení dvou a více snímků, v tomto případě je použito dvou a více totožných 2D snímačů, následném nalezení společných bodů a výpočtu jejich vzdálenosti. Princip je uveden na Obr. 4.17 a vztahy lze odvodit na základě podobnosti trojúhelníků:

$$\frac{z_p}{f} = \frac{x_p}{u_L} = \frac{x_p - s_x}{u_R} \quad (4.18)$$

$$\frac{z_p}{f} = \frac{y_p}{v_L} = \frac{y_p}{v_R} \quad (4.19)$$

Levý 2D snímač



Obr. 4.17 Princip metody stereo vidění – určení vzdálenosti sledovaného bodu v ose z

Pokud je uvažováno stereo video pro dva 2D snímače s paralelními optickými osami, stejnou ohniskovou vzdáleností f [mm], základnou s_x (definované posunutí kamery v horizontálním směru, v ose x , v mm), odpovídajícími obrazovými body (u_L, v_L) a (u_R, v_R) lze umístění 3D bodu v ose z [mm] odvodit z rovnic předchozích snímků:

$$z_p = \frac{f \cdot b_x}{(u_L - u_R)} = \frac{f \cdot s_x}{d_{dis}} \quad (4.20)$$

Pro další souřadnice platí:

$$x_p = u_L \cdot \frac{z_p}{f} = u_L \cdot \frac{s_x}{(u_L - u_R)} \quad (4.21)$$

$$y = v_L \cdot \frac{z_p}{f} = v_L \cdot \frac{s_x}{(u_L - u_R)} \quad (4.22)$$

Triangulace tak pro získání hloubky v ose z využívá disparitu d_{dis} (rozdíl dvou bodů v horizontální rovině $u_L - u_R$, nazývaný též horizontální paralaxa). Využívá se skutečnosti, že hloubka z_p je nepřímo úměrná disparitě.

Pro výpočet chyby měření je nutné vzít v potaz chybu určení úhlu odpovídající změně pozice o jeden pixel na kameře $\Delta\alpha_s = \frac{\alpha_s}{u_{s\,pixel}}$, kde α_s je zorný úhel snímače ve stupních a $u_{s\,pixel}$ je rozměr snímače v pixelech [70]. Výsledná chyba je pak daná vztahem

$$\Delta d_{dis} = \frac{d_{dis}}{s_x} \operatorname{tg}(\Delta\alpha_s) \quad (4.23)$$

Samotná interpretace získaných obrazových dat za účelem získání 3D modelu spočívá v rozpoznávání shodných bodů na povrchu sledovaného objektu a dosazení rozdílu pozice

těchto bodů do rovnice (4.20). Tento postup je ovšem náročný na výpočet korelace jednotlivých bodů a tak při praktickém řešení úloh (tam kde je to možné) se využívá značkování povrchu objektu pomocí rozpoznatelných bodů. Separace jednotlivých bodů lze dosáhnout například barevným odlišením nebo časovým rozlišením (vytváří se jednotlivé snímky s jednou značkou). Citlivost metody je dána především rozlišením 2D snímačů a vzdáleností, ze které je objekt snímán.

Dalším přístupem interpretace dat je kalibrační postup, kdy jsou snímače umístěny libovolně v prostoru, jejich vzájemná pozice je neznámá. V tomto případě není využit vztah (4.20). Stereo kalibrace je odvozena od základu epipolární geometrie. Epipolární geometrie je vnitřní projektivní geometrie mezi dvěma pohledy kamer, je nezávislá na struktuře scény a je pouze závislá na vnitřních a vnějších parametrech kamery [82]. Na začátku musí být provedena prvotní kalibrace pomocí referenčních rovin s referenčními body (často ve formě šachovnice). Výhodou je prakticky nulová závislost výsledku měření na vadách objektivu. Díky prvotní kalibraci je zahrnut vliv optických vad objektivu do měření. Princip stereo vidění byl testován v kap. 6.7.1.6.

4.4.2.4 Pasivní triangulace z jednoho 2D snímače ve více polohách

Jedná se o snímání pomocí jednoho 2D snímače, který mění polohu za získání dvou a více snímků (nazýváno také jako metoda *tvar z pohybu*). Poloha snímačů musí být známa při pořízení snímků (alespoň vzájemná). Princip je stejný, jako byl uveden v předcházející kapitole. Pro metodu není rozhodující, z kolika 2D snímačů byla obrazová data pořízena, ale počet obrazových dat, kdy musí být získány dva a více snímků. Druhou možností je registrace minimálně dvou bodů, jejichž vzájemnou polohu známe.

Tato metoda je hojně využívána pro zmapování zemského povrchu, kdy jedno záznamové zařízení s 2D snímačem se pohybuje nad terénem na nosiči (často letadlo nebo družice). Pohyb snímače následně musí být svázán s dalšími senzory k detekci polohy a určení souřadnic v osách x , y a také z (je třeba znát vzájemnou polohu pořízení dvou následných snímků).

4.4.3 Kombinace pasivních a aktivních technik triangulace

Důvodů pro kombinaci aktivních metod triangulace zejména se stereo viděním je několik. Především se jedná o zvýšení přesnosti metody a zajištění spolehlivosti získaných dat pro následnou interpretaci. Tento multisenzorový přístup (senzorová fúze) je v praxi využíván pro průmyslová zařízení. Příkladem mezi mnoha zařízeními může být Atos II a RevScan, které jsou používány na TUL.

Systém Atos II je založen na principech optické triangulace, fotogrammetrii a metodě Fringe Projection – kdy projektor skeneru promítá na měřený objekt různé vzory proužků, které jsou snímány dvěma 2D snímači (kamerami) ve VIS. Automatické složení jednotlivých záběrů do jednoho celku je zajištěno nejčastěji pomocí tzv. referenčních značek (není ale podmínkou), které se umísťují přímo na měřený objekt, případně jeho okolí (měřicí stůl,

upínací přípravek apod.). Nejdůležitější částí systému je samotný optický 3D skener, který je tvořen projektorem, dvěma kamerami a řídicí jednotkou. Každý nakonfigurovaný senzor definuje ve směru skenování 3D oblast, v níž lze měřený objekt skenovat – tzv. měřící objem. Zařízení tak používá aktivní metody 3D triangulace – techniky světelného vzoru (kap. 4.4.1.3) a pasivní triangulace ze dvou snímků (kap. 4.4.2.3). Objekt se často také natáčí a snímkuje z více pozic. Počet snímků tak bývá v desítkách. Součástí zařízení je výkonný software, který vypočítá s vysokou přesností souřadnice stovky tisíc bodů pro jednotlivá měření. Díky referenčním bodům systém automaticky zjistí aktuální polohu senzoru a transformuje jednotlivé záběry do společného (globálního) souřadnicového systému měřeného objektu. Následuje softwarová úprava naskenovaných dat. Nejprve je provedeno spojení dílčích snímků dohromady, dále je možné odmazat nepotřebné části vzniklého 3D modelu a nakonec provést výpočet optimalizované polygonální sítě. Takto vzniklý model je základním výstupem procesu digitalizace, který lze uložit např. ve formátu G3D, POL, PLY nebo zřejmě nejpoužívanějším STL. Lze ho využít pro následnou úpravu a tvorbu modelu např. pro CNC obrábění, využít pro přímý 3D tisk nebo pro kontrolu přesnosti výroby. Přesnost měření je u tohoto systému uváděna až 0,03 mm [83].

Mobilní optický 3D skener RevScan pracuje na principu projekce světelného kříže na měřený objekt, který je snímán dvěma kamerami. Je tedy založen také na metodě 3D triangulace – techniky světelného vzoru (kap. 4.4.1.3) a pasivní triangulace ze dvou snímků (kap. 4.4.2.3). Princip je podobný jako u skeneru Atos, zde se však nepromítá sada proužků světla, ale pouze laserový kříž v červeném spektru světla. Skener nepotřebuje externí zařízení k určení vlastní polohy vůči snímanému objektu. Pro zjištění pozice používá tento skener reflexní značky (body), které mohou být náhodně umístěné na ploše snímaného objektu a/nebo kolem dílu. Na rozdíl od skeneru Atos zde není možné skenování bez použití těchto bodů. Pro skener RevScan je třeba použít speciální reflexní bílé body – důvodem je umístění filtrů světla před každou kamerou, které propouštějí jen úzké spektrum světla v červené oblasti. Proto je při skenování objekt a hlavně značky nasvětlovány červeným světlem z LED reflektorů umístěných kolem každé kamery. Přesnost měření je uváděna až 0,1 mm [83].

4.4.4 Systémy s teodolitem

Další z možností rekonstrukce 3D objektů je použití měřicího systému s teodolitem. Tento systém je vůbec nejpresnějším triangulačním systémem s relativní chybou menší než pět miliontin procenta. K měření se využívá minimálně dvou teodolitů, které zaostřují měřený předmět. Horizontální a vertikální úhly jsou měřeny elektronicky a 3D souřadnice jsou určeny z měřených úhlů a ze známých pozic teodolitů. Měření trvá dlouhou dobu a výsledné souřadnice jsou určeny z měřených úhlů a ze známých umístění teodolitů. Tento způsob není díky dlouhé době měření vhodný pro pohyblivé předměty, je však díky vysoké přesnosti hojně využíván například ve stavebnictví. Pro získání 3D objektů se nejvíce jako vhodný.

4.4.5 Podoba ze stínování

Metoda podoba ze stínování, nebo také metoda měření tvaru pomocí stínů, je založena na získání virtuálního 3D modelu povrchu objektu z analýzy intenzivního průběhu snímaného objektu [11]. U technik tohoto typu se určují normály povrchových elementů z ozáření, stínů a odlesků na obraze. Pro identifikaci je nutné znát přesnou polohu 2D snímače a zdroje (zdrojů) záření. Virtuální 3D model povrchu objektu je získán z analýzy. V tomto specifickém případě je teoreticky možné (ale nepříliš vhodné s ohledem na kvalitu výsledku) použití pouze jednoho snímku. Předpokladem pro úspěšné použití metody je, že povrch předmětu je převážně Lambertovský (kap. 3.1.7.1) a je ve svých odrazových vlastnostech převážně homogenní. Pokud tedy povrch odráží Lambertovsky, vychází se z rovnice ozáření $E(u, v)$ [W m^{-2}] nekonečně malého senzoru světla umístěného v pozici u, v v obrazové rovině. Ozáření $E(u, v)$ je ve vztahu k odpovídající plošce povrchu, který je určený parametry x, y . Za předpokladu, že světelný paprsek není znatelně zeslaben médiem mezi povrchem a senzorem, lze vyjádřit tento vztah ve formě rovnice ozáření uvádějící vztah mezi orientací povrchu a měřeným jasem v obraze:

$$E(u, v) = R(x, y)R_F (\mathbf{n}(x, y) \cdot \mathbf{L}, \mathbf{N}(x, y) \cdot \mathbf{V}, \mathbf{V} \cdot \mathbf{L}) \quad (4.24)$$

kde $R(x, y)$ je koeficient odrazivosti, R_F je funkce odrazivosti [W m^{-2}], $\mathbf{n}(x, y)$ je lokální orientace normály, \mathbf{L} je směr ke zdroji záření a \mathbf{V} je směr k 2D snímači (kap. 3.1.1). Jinak řečeno, rovnice uvádí v parametrickém tvaru vztah mezi ozářením plochy senzoru a koeficientem odrazivosti spolu s funkcí odrazivosti. Na základě změn odrazivosti, které se projeví změnami jasu ve snímaném obraze, lze přímo usuzovat na tvar povrchu sledovaného objektu. Řešení úlohy je ovšem velmi složité, numericky nestabilní a lze je nalézt jen za drastických zjednodušujících předpokladů. Ve většině případů se proto používá pro získání obrazu na základě stínů více snímků. Rozšířením této metody tak je například fotometrické stereo.

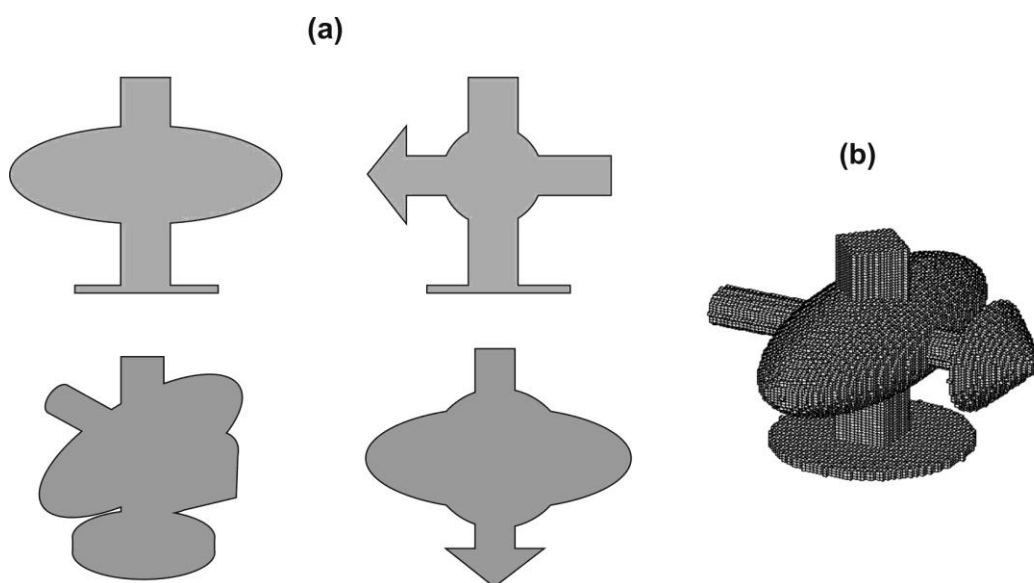
Problematikou ozáření, určením hodnot pro dané tvary, gradientním prostorem se zabývá [14] a podrobněji [84].

4.4.6 Fotometrické stereo

Fotometrické stereo je v podstatě rozšířením metody podoby ze stínování. Metoda fotometrického sterea umožňuje výpočet gradientu v každém pixelu difúzně-odrazivého (matného) povrchu, pokud jsou k dispozici alespoň tři fotografie pořízené statickou kamerou a tři zdroje světla, jejichž směrové vektory neleží ve stejné rovině. Ze znalosti gradientů je dále možné sestavit matici výšek a provést tak rekonstrukci reliéfu [85, 86]. Ve většině případů je používán jeden 2D snímač a několik zdrojů záření, které jsou zapínány pro každý jednotlivý snímek. Tato metoda je vhodná pro detekci povrchových struktur i u lesklých povrchů, příkladem může být komerční produkt [87], praktické využití na detekci textilie je zmíněno v [5]. Testován byl princip v kap. 6.7.1.4.

4.4.7 Tvar z obrysu

Tvar z obrysu (kontury) je založen na snímkování objektu z mnoha stran, získání obrysu objektu a složení těchto obrysů do 3D obrazových dat na základě znalosti vzájemné polohy objektu a snímáče [88–90]. Získání 3D obrazu je založeno na získání obrysů sledovaného hladkého objektu z 2D snímků, které jsou reprezentovány křivkami. Schematicky je princip zobrazen na Obr. 4.18. Předpokladem je, že objekt bude vůči pozadí v kontrastu, aby mohly být kontury ze siluety jednoznačně získány. Hladký konvexní tvar lze rychle odhadnout z jeho obrysu a první derivace pohybu obrysu (stopa obrysu nebo rozložení obrysu s časem). Metoda je zvažována pro detekci objektů za použití elektromagnetického záření jiných délek, než je VIS, kap. 6.1.

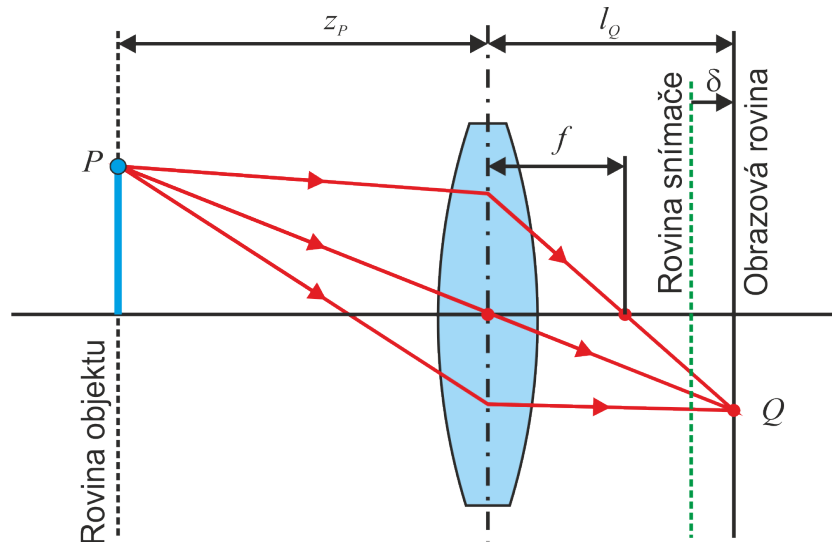


Obr. 4.18 Princip metody tvar z obrysu, (a) získané obrysy, (b) získaný 3D model objektu

4.4.8 Fokusační techniky

Metoda je založena na podobném principu jako konfokální mikroskop, kdy je analyzován ostrý odraz odraženého monochromatického (laserového) paprsku, kap. 3.1.7.5. Rozdíl je v použití osvětlení s více vlnovými délkami a také v rozlišení (u konfokální mikroskopie až nm, u této metody μm). Jedná se o analýzu ostroty snímané scény v jednotlivých bodech snímku. Na Obr. 4.19 je uvedeno zobrazení bodu jedno-čočkovou optikou. Vzdálenost z_P bodu P od optiky (v mm) lze vypočítat s pomocí parametrů optiky (ohniskové vzdálenosti) f [mm] a vzdálenosti obrazové roviny l_Q [mm] ze vztahu (podle [91]):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_P} + \frac{1}{l_Q} \quad (4.25)$$



Obr. 4.19 Princip metody fokusování

V tomto případě nebude na snímáči (jak je zobrazeno na Obr. 4.19 zeleně) zobrazený bod fokusovaný (zaostřený) do bodu, ale bude odpovídat plošce. Obsah plošky se bude měnit se vzdáleností l_Q . V okamžiku, kdy vzdálenost roviny snímáče od obrazové roviny $\delta = 0$, bude mít tento bod na snímáči minimální plochu. Z této vzdálenosti je tak vypočtena vzdálenost z_P bodu P . V obraze se tak hledají kontrastní body, které se dále analyzují. Měření může probíhat na základě pohybu ve směru normály k povrchu [70]:

- detekčním zařízením,
- sledovaným objektem.

Vyhodnocení probíhá na základě analýzy matice v okolí bodu o velikosti $m \times m$ a zjišťování minima plochy daného bodu ve vztahu k jeho jas (intenzitě záření E). Je využíván Laplaceův filtr pro intenzitu záření v okolí měřeného bodu v rovině snímáče u, v . Vzhledem k možnosti záporné druhé derivace se používá absolutní hodnota derivací

$$\nabla^2 E(u, v) = \left| \frac{\partial^2 E(u, v)}{\partial u^2} \right| + \left| \frac{\partial^2 E(u, v)}{\partial v^2} \right| \quad (4.26)$$

Sleduje se průběh intenzity v měřeném bodě vzhledem k měnící se vzdálenosti povrchu z_P , který by měl mít gaussovský průběh se změnou vzdálenosti ve směru normály. Maximum odpovídá optimální fokusaci (zaostření) a výchylce z_P .

4.4.9 Metody optické interferometrie

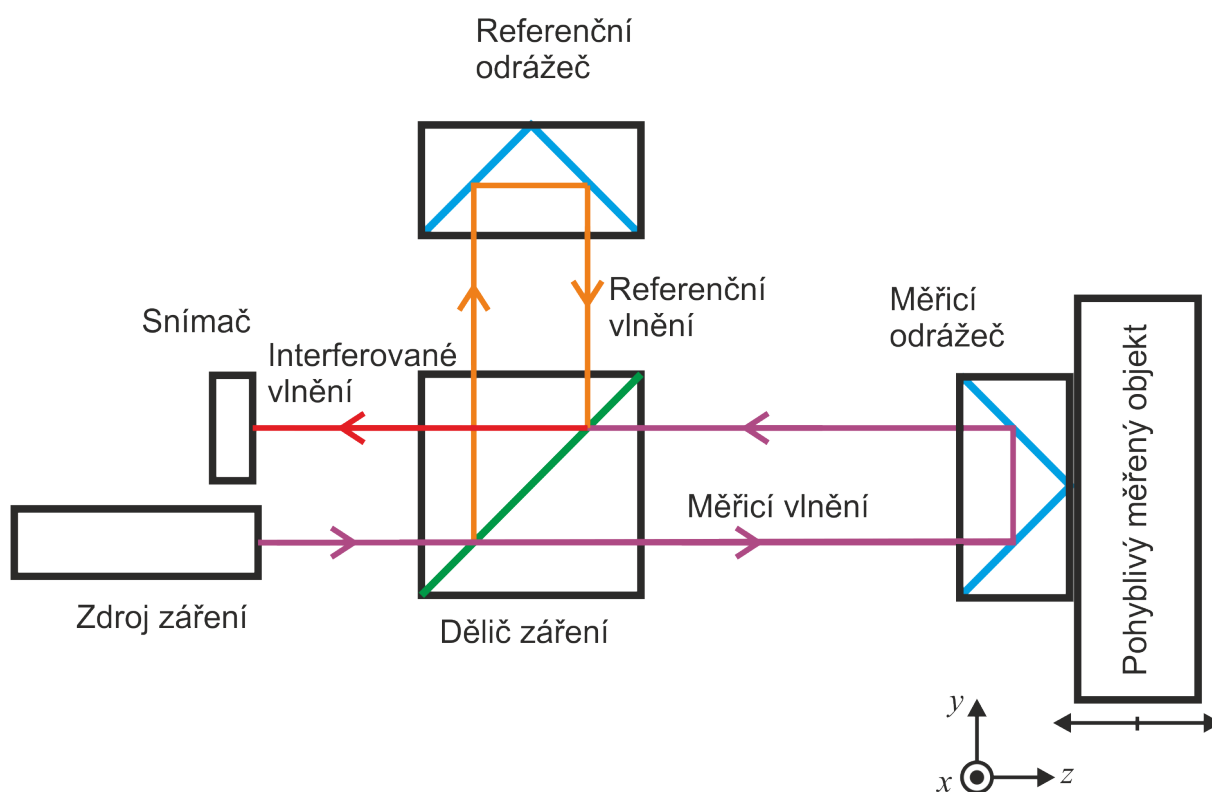
Jedná se o metody použitelné pro velmi přesná měření, která jsou založena na interferenci světla (skládání vlnové složky elektromagnetického záření a projevují se zesilováním nebo zeslabováním intenzity záření). Princip metody je založen na měření doby letu koherentního elektromagnetického záření. Jak ukazuje Obr. 4.20 je vlnění děličem rozděleno na měřicí (signálové, předmětové) a referenční.

Měřicí vlnění se odráží od měřicího odražeče a v děliči vlnění může interferovat s

vlňením referenčním, které urazilo jinou vzdálenost. Vznikne tak vlňení, jehož celková intenzita záření $[W\ m^{-2}]$ je dána tzv. interferenční rovnicí

$$|E(x,y)|^2 = |E_P(x,y)|^2 + |E_R(x,y)|^2 + 2|E_P(x,y)| \cdot |E_R(x,y)| \cdot \cos(\varphi_P(x,y) - \varphi_R(x,y)) \quad (4.27)$$

kde $E_P(x,y)$ je intenzita měřicí (předmětové) vlny a $\varphi_P(x,y)$ je její fáze, $E_R(x,y)$ je intenzita referenční vlny a $\varphi_R(x,y)$ je její fáze, pak předmětová vlna je dána jako $|E_P(x,y)| \cos(\varphi_P(x,y))$ a vlna referenční jako $|E_R(x,y)| \cos(\varphi_R(x,y))$, kde x a y jsou prostorové souřadnice v rovině interference. Takto je možné interpretovat data pro získání informace o amplitudě vlňení, a také nepřímou o její fázi, respektive fázovém rozdílu (záznamové prostředky dokážou reagovat pouze na intenzitu záření, tedy nedokážou fázi vlňení zaznamenat přímo). Protože je měřen fázový rozdíl, neumožňuje metoda měřit absolutní vzdálenost zkoumaných bodů. Jednoznačné určení vzdálenosti objektu lze získat jen ve velmi úzkém rozsahu závislém na vlnové délce použitého světla (v rozsahu poloviny vlnové délky λ).



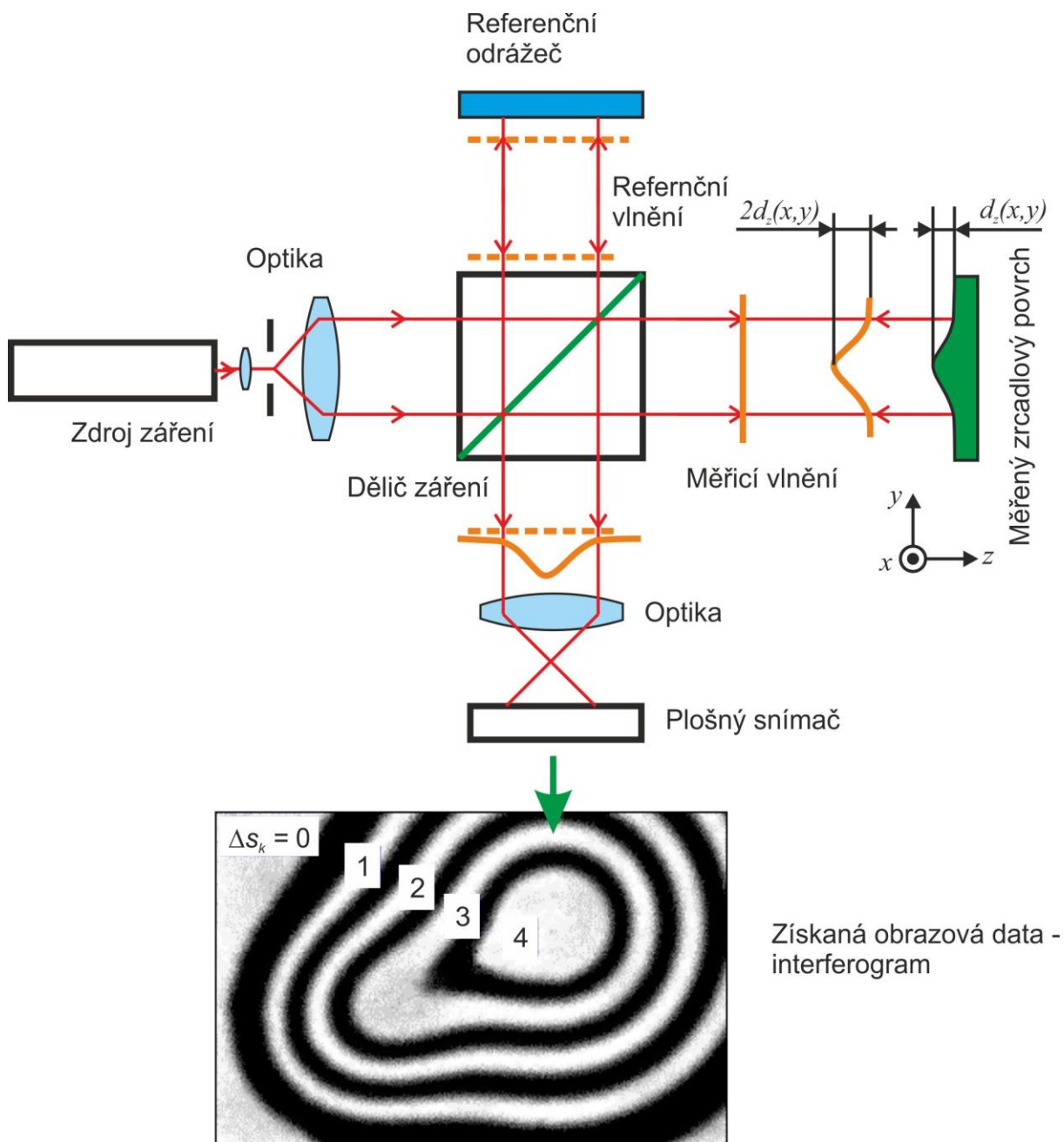
Obr. 4.20 Blokové schéma interferometru pro „bodové“ měření vzdálenosti

Ze získaného interferogramu nelze dále přímo zjistit, zda interferenční řád směřem od referenčního místa roste či klesá a z toho pak, zda povrch je konkávní, či konvexní. Nejčastěji se používají interferometry Michelsonův (Obr. 4.21), Sagnacův, Fabry-Peretův, Mach-Zehnderův aj., jež se liší především ve způsobu rozdělení vlňení na měřicí a referenční a podle celkového uspořádání jednotlivých opticko-mechanických prvků. Pro představu o fungování interferometru pro měření vzdálenosti na ploše je na Obr. 4.21 zobrazen

Michelsonův interferometr [92]. Získaná obrazová data mají charakter vrstevnic (jak je zřejmé na Obr. 4.21), které reprezentují změnu interferenčního řádu ΔS , kde výška plochy $d_z(x, y)$ je

$$d_z(x, y) = \Delta S_k(x, y) \frac{\lambda}{2} \quad (4.28)$$

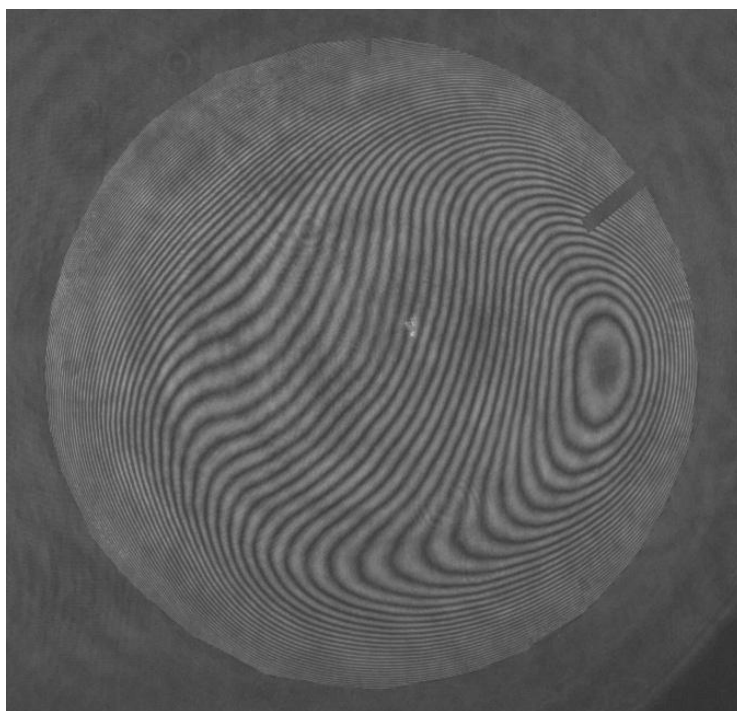
λ je vlnová délka. Obecný příklad získaných obrazových dat na Obr. 4.22.



Obr. 4.21 Michelsonův interferometr – měření vzdálenosti na ploše (podle [92])

Nejvýznamnější principy založené na základech optické interferometrie jsou (podle [71]):

- 1) Interferometrie pracující s více vlnovými délkami – metoda pracuje se synteticky vytvořenými frekvencemi (v rozsahu mega a gigahertzů) vzniklými superpozicí dvou velmi podobných vlnových délek. Takto generované frekvence přímo určují rozsah, ve kterém lze vzdálenosti měřit bez nejednoznačností. Za ideálních podmínek je možné měřit absolutní vzdálenost přes několik desítek metrů s rozlišením v nanometrech.



Obr. 4.22 Obecný příklad interferogramu zrcadla pro teleskop, zdroj [93]

- 2) Holografická interferometrie – umožňuje měřit povrchové deformace 3D objektů, např. po tepelném nebo mechanickém namáhání, vibrace, malé posuvy objektů, atd., a to s přesností až ve zlomcích vlnové délky použitého laserového světla. Technika je založená na interferenci světelného vlnění pocházející ze dvou různých stavů objektu, tedy v různém čase (např. před a po mechanickém zatížení). Nejdříve je pořízen hologram původního objektu, kdy referenční vlna potřebná pro záznam hologramu nemá přímý vliv na výslednou informaci a může tedy mít libovolnou prostorovou strukturu. Poté je objekt vystaven měřenému namáhání (dojde ke změně fáze vlnění). Původní hologram je pak promítnut na deformovaný předmět (přeložení obou obrazů) a tam, kde došlo ke změně, se objeví interferenční struktura. Výsledný interferogram tedy charakterizuje vzniklé namáhání.
- 3) Skvrnová interferometrie – skvrny jsou generovány v případě, že koherentní světlo je odraženo od hrubého, nerovného povrchu. Odražené vlnoplochy interferují se všemi dalšími na povrchu detektoru a vytváří tak skvrnitý vzor, který je charakteristický pro drsné povrchové elementy. Jakmile přijde další referenční paprsek, vytvoří se nový vzor,

který je přiložen k prvnímu. Vznikne tak skvrnový interferogram. Potom, co je objekt zdeformován, je vytvořen druhý interferogram. Odečtením tohoto interferogramu od původního je získán rozdílový interferogram, kde vzdálenosti mezi proužky korespondují s relativní vzdáleností objektu.

- 4) Interferometrie s bílým světlem – je založená na měření doby letu, proto umožňuje (oproti fokusovacím technikám, kterým se na první pohled podobá) měření s malou aperturou, což přináší možnost měření hloubky velmi úzkých děr a vrtů. Dobré výsledky lze získat u zdrojů světla s velkou šířkou pásma, u kterých se dosahuje silného interferenčního efektu (prudké výkyvy signálu se změnou hloubky). Velkou výhodou této metody je možnost měření i na drsných, nerovných površích, což je velký rozdíl oproti klasické interferometrii a činí metodu zajímavou pro použití v průmyslu.

4.4.10 Měření doby letu modulovaného laserového paprsku

Jedná se o snímáče označované jako ToF (Time of Flight). Princip je založen na měření vzdálenosti bodu objektu P (v ose z) z doby letu t paprsku elektromagnetického záření od jeho vyslání, odrazení od objektu, až po jeho opětovné zachycení senzorem podle vztahu:

$$z_P = c \frac{t}{2} \quad (4.29)$$

kde c je rychlost světla. Nevýhodou této metody je skutečnost, že rychlost světla c je extrémně vysoká, z čehož vyplývají velké nároky na přesnost měřicího zařízení. U běžně používaných zařízení je prováděno měření doby modulovaného elektromagnetického záření (signálu). Obvykle se modulace provádí korelací s vhodným referenčním signálem a lze ji rozdělit na:

- pulzní,
- pseudonáhodnou,
- spojitou.

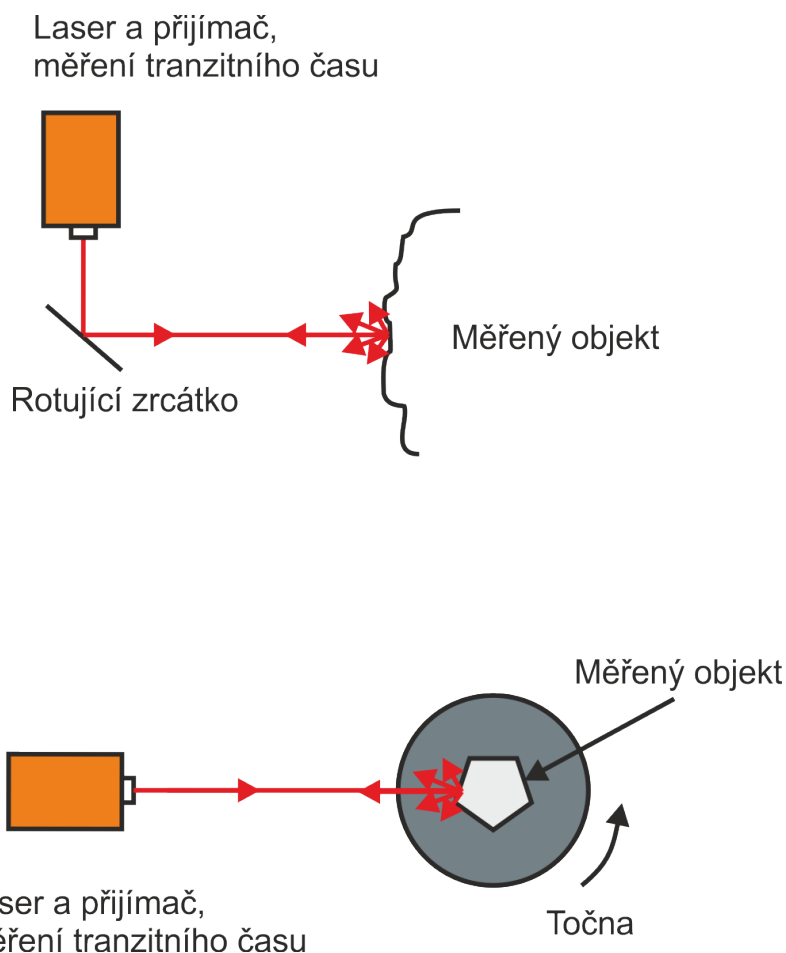
Ačkoliv metody založené na modulaci i na interferometrii vycházejí ze stejného principu – měření doby letu, používají se metody pracující s modulací pouze u aplikací s menšími nároky na rozlišení a přesnost (řádově přesnost v desítkách mm). Interferometrické techniky lze aplikovat v širokém rozsahu i u měření s nanometrickou přesností.

Schéma s možnými principy provedení měření jsou na Obr. 4.23. Tento typ skenerů lze dále rozdělit na:

- a) 2D, kdy je snímána linie a výška. Třetí rozměr musí být získán pohybem laseru (nebo sledovaného objektu). Tyto systémy lze nazývat „letecké“, neboť jsou používány při mapování z letadel nebo družic. Nacházejí použití především pro získání digitálního modelu terénu větších území, mapování břehů vodních toků, záplavových území a zejména pak při dokumentaci liniových staveb, jako jsou silnice, produktovody a elektrická vedení vysokého napětí.

- b) 3D (pozemní) skenery nacházející uplatnění v architektuře, urbanismu, archeologii, při dokumentaci složitých technologických a průmyslových provozů, v dopravním stavitelství, při určování kubatur.

Průmyslové snímače ToF vycházejí z výše uvedeného principu. Laserový paprsek má většinou vlnovou délku v NIR oblasti (od 850 až 950 nm). Zásadní rozdíl od klasických laserových dálkoměrů je v množství změřených bodů v relativně krátkém okamžiku. Snímače ToF byly použity v práci pro testování detekce objektů s lesklým povrchem (kap. 6.7.1.4).



Obr. 4.23 Princip skenovacích laserových systémů na principu ToF

4.4.11 Možnosti interpretace mračna bodů

U mnoha zde prezentovaných metod (pasivní i aktivní triangulace, ToF, ...) je získáno velké množství bodů ve formě obrazových dat (tzv. mračno bodů), které snímač proměří v určitém zorném poli. Je to v podstatě mřížka bodů, která má pravidelné úhlové rozestupy, přičemž každý bod má souřadnice v ose x , y , z . U každého bodu mračna jsou známy směry a vzdálenost od zařízení, takže je známa i prostorová poloha. Obrazová data ve formě mračna bodů se dále interpretují (získání a analýza ploch, vyhodnocení libovolných řezů apod.). Prezentace výsledků zpracování nebo samotného mračna bodů je možná v běžných CAD formátech (*.dxf, *.dwg, *.dgn). Jednotlivá data z různých pozic lze spojit v jedno mračno specializovaným software. Dále každý bod mračna může obsahovat barevnou informaci. Buď

to může být hodnota intenzity, např. odrazu laserového paprsku převedená do stupně šedi (x, y, z , intenzita), nebo RGB informace získaná z fotografie (x, y, z, R, G, B).

4.4.12 Tomografie

Tomografie znamená zápis obrazu v řezech, tedy strukturní zobrazování objektu uvnitř i na povrchu bez fyzického narušení celku. Výsledkem je zobrazení povrchu a vnitřku objektu ve 3D projekci). Zařízení použité pro tomografii je možné formálně nazývat **tomograf** a výsledný obraz **tomogram**. Tomografy používají především vlnění, které proniká skrz předměty a je různě pohlcováno částmi uvnitř sledovaného objektu. Jedná se především o elektromagnetické záření vlnových délek, které pronikají objekty z daného materiálu (rentgenové záření, gama záření, případně i VIS u transparentních objektů), dále o mechanické vlnění (ultrazvuk), velké magnetické pole s buzením elektromagnetickým zářením (magnetická rezonance). U používaných technik musí být zvládnuto přesné kódování voxelů v osách u, v, w , které odpovídá reálným osám x, y, z . Tomografie je založena na matematické metodě zvané **tomografická rekonstrukce**.

Existuje velká řada různých aplikací tomografie, např. [94]:

- atomová tomografická sonda (autoemisní iontový mikroskop s x-y detektorem),
- elektronová tomografie (s využitím TEM, kap. 3.2),
- výpočetní tomografie (CT – *Computed Tomography*, také počítačová tomografie),
- magnetická rezonance (kap. 3.7),
- elektrická impedanční tomografie (kap. 3.5),
- optická koherentní tomografie (založená na interferenci nízko koherentního optického záření s vlnovou délkou nejčastěji v NIR, [44]),
- pozitronová emisní tomografie (tomografická gama kamera, kap. 3.1.9),
- seismická tomografie,
- ultrazvuková tomografie,
- jednofotonová emisní tomografie.

Asi nejznámější metodou je výpočetní tomografie (CT), která využívá rentgenového záření. Objekt (v případě aplikace v medicíně pacient) je umístěn do přístroje, kde po kruhové trajektorii obíhá rentgenka a nejčastěji naproti ní detektory. Komplex rentgenky s detektory vykonává více kontinuálních rotací kolem objektu, který je rovnoměrně posouván skrz tomograf. Výsledkem je tak spirální skenování. To je princip 3. generace tomografů. 4. generace je založena také na rotujícím zdroji, ale detektory jsou umístěné po celém obvodu ve formě prstence [95].

Rentgenka emituje úzký svazek ve tvaru vějíře a na scintilačních detektorech je zaznamenáno prošlé záření objektem a je vypočten a uložen lineární součinitel zeslabení μ_E :

$$\mu_E = \frac{1}{t_m} \cdot \ln \frac{E_{RE0}}{E_{RE}} \quad (4.30)$$

kde E_{RE0} je hodnota vstupní intenzity rentgenového [W m^{-2}] záření, E_{RE} je hodnota výstupní intenzity rentgenového záření [W m^{-2}] a t_m je tloušťka materiálu [m]. V rámci jednoho oběhu

o 360° je získáno 400 až 700 měření z různých úhlů. Získaná data z různých úhlů jsou následně použita pro interpretaci plošných řezů objektem. Jednotlivé získané voxely jsou popsány hodnotou absorpce (součinitele zeslabení) a rozptylem použitého RTG záření, které tvoří příčný řez zobrazovaného objektu počítačovou tomografií. Ke zjištění absorpce voxelu je třeba, aby jím záření prošlo opakovaně, a to pod různými úhly. Výsledná hodnota voxelu (tj. míra absorpce a rozptylu procházejícího záření) je následně vyjádřena pomocí denzitní jednotky – Hounsfieldovy jednotky [HU] (CT číslo), která vyjadřuje absorpci (a rozptyl) záření daného voxelu vztaženou k absorpci (a rozptylu) záření vody (pro vodu platí HU = 0). Hodnota HU je definována podle vztahu:

$$HU = \frac{\mu_E - \mu_{EW}}{\mu_{EW}} \cdot k_{1\,000} \quad (4.31)$$

kde $k_{1\,000}$ je smluvená konstanta o velikosti 1 000, μ_E je lineární součinitel zeslabení vyšetřovaného materiálu (tkáně) [m^{-1}] a μ_{EW} je lineární součinitel zeslabení vody (absorpční koeficient $\mu_{EW} = 0,22 \text{ cm}^{-1}$). V praxi mohou nabývat Hounsfieldovy jednotky hodnot od -1 000 (vzduch), do cca 1 000 (kompaktní kost). Pro diagnostické užití a pro zobrazení výsledného obrazu v odstínech šedi na monitoru je tedy k dispozici 2 000 hodnot, [96].

Zpracování obrazových dat je výpočetně velmi náročné. Výsledné naměřené hodnoty HU jsou sumou všech zeslabení ve směru paprsku RTG a pro jednotlivé voxely je tak potřeba vypočítat jejich hodnoty z několika řezů. Nejčastěji je zmiňována Radonova inverzní transformace, která ale může být nahrazena algebraickými metodami.

Přímé použití vzorce Radonovy inverzní transformace není vhodné z numerického hlediska. Proto byly vyvinuty dva alternativní postupy numerického výpočtu. První skupina sdružuje přímé metody založené na Fourierově řezovém teorému a druhá skupina obsahuje algebraické metody pro řešení úlohy $R_{ap} f_{rek} = b_{data}$, kde R_{ap} je aproximace diskrétní Radonovy transformace, b_{data} jsou data z počítačového tomografu a f_{rek} je rekonstruovaný obraz, více např. [95, 97].

Výhodou rentgenového CT je dobré prostorové rozlišení, získaný 3D obraz, relativně rychlé vyšetření. Nevýhodou je špatný kontrast měkkých tkání a vystavení objektu radiační dávce.

5 Problematika získání a interpretace obrazových dat u povrchové struktury

Tato aplikační část má z uvedených uplatnění obrazové analýzy největší přínos pro vědu. Často se aplikovaný výzkum prolíná se základním výzkumem. Výsledky výzkumu tak mohly být prezentovány v časopisech s impakt faktorem. Velká část výsledků, tedy prošla recenzním řízením a některé publikované texty jsou uvedeny v příloze habilitační práce.

Povrchové struktury jsou v této kapitole hodnoceny pomocí metodiky, která rozvíjí a zobecňuje použití fraktální geometrie spolu s dalšími matematickými nástroji, což volně rozšiřuje problematiku, které se autor věnoval v rámci disertační práce [1, 2]. Problematika byla doplněna o rozsáhlou analýzu povrchů získaných různými technologiemi obrábění a opracování z průmyslové praxe. Důležitým návazným krokem ve vztahu k disertační práci autora je také upřesnění metodiky a výběr vhodných nástrojů pro detekci. Dalším je matematický nástroj pro nalezení koeficientů pro přepočítání na jedno směrodatné číslo pro hodnocení jakosti.

5.1 Hodnocení korozního napadení kovů a slitin

Metodika hodnocení korozního napadení kovů a slitin je dlouhodobě rozvíjena na Technické univerzitě v Liberci. Problematika je zmíněna také v článcích v příloze [P2, P4, P5]. První její popis byl uveden na konferencích v letech 2004 a 2005 [98, 99] a byla dále prezentována [100, 101]. Metodika byla postupně vylepšena a stala se standardní součástí analýzy na pracovišti TUL pro analýzu vlivu skloviny na nový konstrukční materiál na bázi aluminidů železa (patřícího do skupiny intermetalik, [102, 103]) s materiály běžně užívanými ve sklářství [P4, 104–106]. Lze ji obecně použít na analýzu korozního napadení povrchů kovů a jejich slitin okolní atmosférou [P5].

Zobecněným pojmem, který je používán v následujícím textu, je křivka rozhraní, kterým je tak myšleno obecně topologicky jednodimenzionální rozhraní dvou materiálů, zde prezentované rozhraní slitiny a skloviny (kap. 4.2.3). Metodika je používána i pro další rozhraní, jako je rozhraní světla a stínu (kap.5.2) a profil, vlnitost či drsnosti povrchu (kap.5.4).

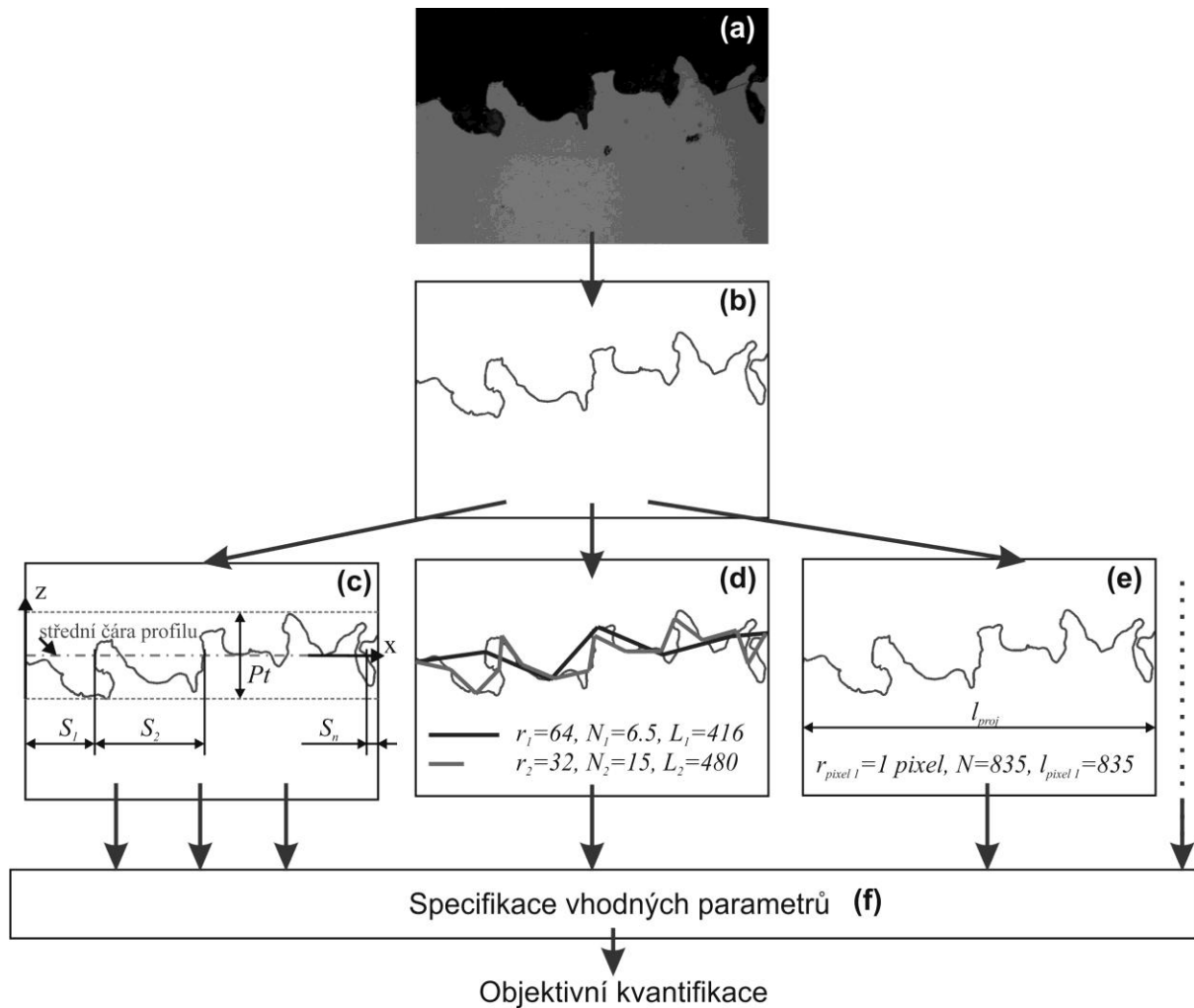
Pojem metodika v této kapitole představuje soubor analýz za použití různých nástrojů, vedoucích k interpretaci dat a výsledku v podobě parametrů křivky rozhraní. Metodika je především inovativní v míře použitých nástrojů a v následném vyhodnocení těch nejvhodnějších.

5.1.1 Princip metodiky

Metodika je založena na obrazové analýze snímků metalografického výbrusu. Jedná se tedy o destruktivní test, který je využíván především ve výzkumu a vývoji materiálů a výrobě dílů z nich.

Postup metodiky je založen na analýze snímku rozhraní mezi kovovým materiálem a okolím (tvořeným sklem, produkty koroze a plyny). Metalografický výbrus je získán z kovových materiálů a jejich slitin, podrobených korozním zkouškám. Vzorek je pak zalit nejčastěji do dentacrylu, broušen a leštěn. Snímky jsou pořízeny na optickém mikroskopu pomocí snímáče (v tomto případě digitálního fotoaparátu). Snímky ve škále šedi (monochromatické) a nekomprimované (ve formátu BMP nebo TIFF) jsou získány daty, která jsou následně interpretována s cílem získání objektivních informací o charakteru křivky rozhraní. Metodika analýzy obrazu je znázorněna na Obr. 5.1 a lze ji rozdělit na tyto kroky (vychází z definovaných pod-procesů v úvodu kap. 4):

- 1) Příprava vzorku (metalografického výbrusu).
- 2) Snímání obrazových dat, tedy získání snímků na více místech vzorku, minimálně na 9 pozicích (Obr. 5.1 a). Metalografické výbrusy musí být kvalitní, bez škrábanců, děr a dalších rušivých prvků. Snímky výbrusů musí být ostré a se zřetelným oddělením slitiny a okolí (kap. 5.1.4). Slitina je ve většině případů reprezentována světlou plochou (světlo ze zdroje mikroskopu se od lesklé plochy odráží) a okolí je reprezentováno převážně tmavou plochou.
- 3) Interpretace obrazových dat:
 - a) Opakovatelné a spolehlivé získání křivek rozhraní (Obr. 5.1 b) z obrazových dat (snímků).
 - b) Získané křivky rozhraní jsou následně analyzovány (interpretovány) a jsou získány parametry (Obr. 5.1 c, d, e), které objektivně popisují charakter sledované křivky rozhraní.
 - c) V závěru jsou vybrány parametry, které společně nejlépe popisují charakter křivky rozhraní. Většinou jsou vybrány tři: parametr amplitudy, parametr frekvence a parametr složitosti a deformace.
- 4) Získané informace jsou použity pro popis míry narušení povrchu slitiny, v tomto případě od narušení roztavenou sklovinou.



Obr. 5.1 Obrazová analýza pro hodnocení korozního napadení: (a) šedotónový snímek získaný pomocí světelné optické mikroskopie, (b) získání křivky rozhraní mezi vzorkem a okolím (sklo, produkty koroze, plyny, dentacryl), (c) parametry amplitudy (P_t – maximální výška profilu) a parametr frekvence (S_m – střední rozteč nerovnosti povrchu), (d) výpočet obvodové dimenze, (e) výpočet relativní délky L_R , (f) specifikace parametrů pro objektivní kvantifikaci, [P5]

Kroky metodiky jsou v bodech 2 a 3 automatizovány pomocí software vyvinutého autorem této práce. Ke správnému vyhodnocení je přesto nutné zajistit určité obrazové vlastnosti získaného a následně hodnoceného snímku metalografického vzorku. Tím je myšleno zajištění podobné hodnoty jasu a kontrastu na jednotlivých porovnávaných snímcích (malé rozdíly ovšem nevedou ke znatelným změnám výsledků, kap. 5.1.4). Snímek musí zahrnovat počátek rozhraní na levé straně a konec na pravé straně snímku a přitom nesmí být rozhraní přerušeno na dolním nebo horním okraji. Vhodný snímek je zobrazen na Obr. 5.1 a. Dále musí být snímky pořízeny ve stejném zvětšení, rozlišení a formátu. Uvedené požadavky představují nutné podmínky pro úspěšnou interpretaci obrazových dat a bez jejich splnění není možné analýzu provést.

Pomocí nástrojů obrazové analýzy je získána kontura mezi světlou a tmavou plochou. Nutné je v tomto případě zvolit vhodnou prahovou hodnotu, která rozdělí stupně šedi na

pouze bílé a černé body, kap. 4.2.2. U snímků s jasným rozhraním slitiny a okolí lze prahovou hodnotu získat automaticky. Prahová hodnota má vliv na samotné získání rozhraní a za určitých okolností může změnit charakter získané křivky rozhraní. Tím může ovlivnit i výsledky popisu křivek rozhraní, kap. 5.1.4. Pro celou škálu hodnocených snímků, jež jsou porovnávány, je volena hodnota konstantní. Vyvinutý software pak dokáže v binárním obraze rozpoznat správnou konturu reprezentující křivku rozhraní mezi slitinou a okolím. Případné ostatní získané kontury na snímku již nejsou dále využity pro hodnocení křivky rozhraní.

Pro popis křivky rozhraní byl použit odhad fraktální dimenze pomocí obvodové metody, statistické nástroje a parametry drsnosti (v textu jsou uváděny s počátečním písmenem P místo R , např. R_a jako P_a , neboť se jedná o popis profilu nikoliv samotné drsnosti, tak jako často v průmyslové praxi). Na základě dlouhodobého vývoje metodiky lze použité metody rozdělit podle charakteru získaných parametrů:

- *parametry amplitudy*, které jsou používány pro charakterizaci rozdílů v hloubce narušení (např. Std – směrodatná odchylka, P_a – střední aritmetická úchylka profilu, P_t – maximální výška profilu povrchu),
- *parametry frekvence*, které jsou používány pro popis parametrů odstupu profilu povrchu a k charakterizaci vlnové frekvence (např. Sm – střední rozteč nerovností profilu),
- *parametry složitosti a deformace*, které popisují složitost křivky (např. D_C – obvodová dimenze, L_R – relativní délka profilu).

Zmíněné parametry amplitudy a frekvence jsou běžně používány při experimentech a v průmyslové praxi pro účely následného porovnání jsou přepočteny na μm . Směrodatná odchylka je jednou z nejčastěji používaných měr variability při statistickém zpracování dat. Podobně rozpětí, které je ovšem při hodnocení jakosti povrchu po obrábění označováno jako maximální výška profilu P_t (Obr. 5.1 c).

Střední aritmetická úchylka profilu P_a je počítána z 5 intervalů, je dána střední aritmetickou hodnotou absolutních úchylek profilu

$$P_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (5.1)$$

přibližně

$$P_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (5.2)$$

Jedná se o nejpoužívanější parametr drsnosti, jehož význam je však často přeceňován.

Střední rozteč nerovnosti profilu je sumou vzdáleností mezi vrcholky, dělenou počtem vrcholků, které jsou definovány relativně ke střední čáře profilu ($S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ Obr. 5.1 c). Vrcholky musí překročit střední čáru a potom se vrátit zpět

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (5.3)$$

Výpočet parametrů P_a , P_t a S_m je dán mezinárodní normou ISO 4287-1997 [107].

Relativní délka (L_R) vychází z délky křivky profilu změřené nejmenším krokem měřidla $r_{pixel\ 1} = 1\ pixel$ pomocí N kroků:

$$l_{pixel\ 1} = N \cdot r_{pixel\ 1} \quad (5.4)$$

Relativní délka L_R je poměr změřené délky $l_{pixel\ 1}$ a celkové projekční délky l_{proj} (Obr. 5.1 e):

$$L_R = \frac{l_{pixel\ 1}}{l_{proj}} \quad (5.5)$$

Poměrná délka L_P je poměr mezi délkou křivky změřenou definovaným krokem v pixelech l_{pixel} a délkou změřenou maximálním krokem (délka úsečky mezi prvním a posledním bodem křivky) l_{max} :

$$L_P = \frac{l_{pixel}}{l_{max}} \quad (5.6)$$

Uvedená relativní a poměrná délka byly stanoveny a odvozeny autorem této práce. Odhad fraktální dimenze pomocí obvodové metody je založen na výpočtu závislosti změny délky analyzované křivky rozhraní s použitou délkou kroku (Obr. 5.1 d). Výpočet odhadu fraktální dimenze obvodovou metodou je zmíněn v kap. 4.3.1.

Vyvinutá metoda popisu křivky rozhraní obsahuje celkem 22 parametrů (v tomto textu byly uvedeny jen některé z nich). Nicméně, pro celkovou a spolehlivou analýzu může být prokazatelně použito několik z nich. To zjednodušuje celkovou analýzu a snižuje výpočetní čas. Důvodem možného omezení parametrů je vzájemná lineární korelace některých parametrů (ty tak pravděpodobně poskytují podobné informace o struktuře rozhraní). Takovéto parametry se stejnou informací mohou být redukovány. Z tohoto důvodu byly vypočteny Pearsonovy korelační koeficienty za účelem objektivního vyhodnocení parametrů. Pokud se předpokládá lineární korelace, můžeme specifikovat vhodné parametry pro vyhodnocení. Vhodnou strategií je získat jeden parametr z každé skupiny: parametr amplitudy, parametr frekvence a parametr složitosti a deformace. Tyto tři parametry poskytují různorodé informace o datech, což umožňuje spolehlivý, objektivní popis charakteru oxidačního narušení studovaných slitin. Vybírání je nejnižší korelační koeficient mezi parametry ve srovnání s jinou skupinou.

Výsledky celého souboru dat (minimálně 9 snímků z každého vzorku) jsou statisticky zpracovány. Nejčastěji je počítán průměr, rozsah hodnot a směrodatná odchylka všech vybraných parametrů pro každou hodnocenou slitinu.

5.1.2 Příklad aplikace: odolnost slitin vůči roztavené sklovině

V této části práce je uvedeno porovnání aluminidu železa Fe-14Al-6Cr s běžně ve sklářství používanou chromniklovou ocelí AKC (podle evropské normy EN X8CrNi25-21). Kapitola vychází z recenzovaného textu [P4] uvedeného v příloze a textu [101]. Aplikace metodiky pro porovnání vlivu skloviny na slitiny aluminidů železa s ocelí AKC jsou uvedeny také v disertační práci a monografii [1, 2] a v odborných článcích [P4, 104–106].

Chemické složení zkoumaných slitin je uvedeno v Tab. 5.1. Jako vzorky byly použity válečky o průměru 12 mm a výšce 18 mm. Povrch vzorků byl broušen a finální operací bylo broušení SiC papírem o zrnitosti 1 200. Vzorky byly vystaveny působení sodnovápenaté skloviny, jejíž složení je uvedeno v Tab. 5.2, při teplotě 1 200 °C. Každý vzorek byl položen podstavou válečku na dno kelímku z oxidu hlinitého. Kelímek byl naplněn skleněnými střepy uvedené skloviny a byl následně zahřát v peci na teplotu 1 200 °C. Korozní testy byly provedeny v časových intervalech: 24, 48, 72, 96 a 168 hodin. Po každém časovém intervalu se kelímek v peci pomalu ochlazoval a kelímek byl pak opatrně rozbit. Odolnost proti korozi obou slitin, včetně vzorků před zkouškou (v surovém stavu, tedy základní stav, čas: 0), byla stanovena a porovnána pomocí vyvinuté metodiky.

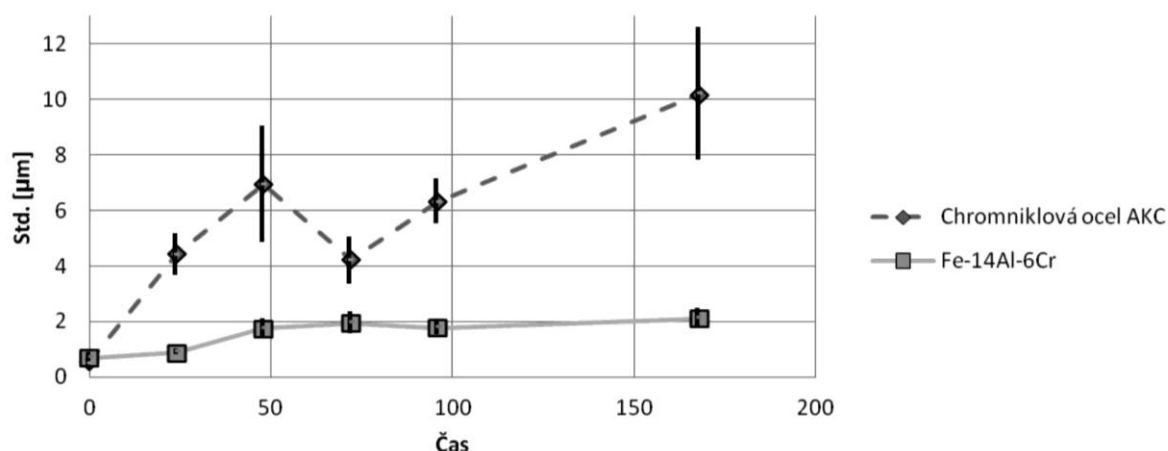
Tab. 5.1 Chemické složení slitin použitých v experimentu

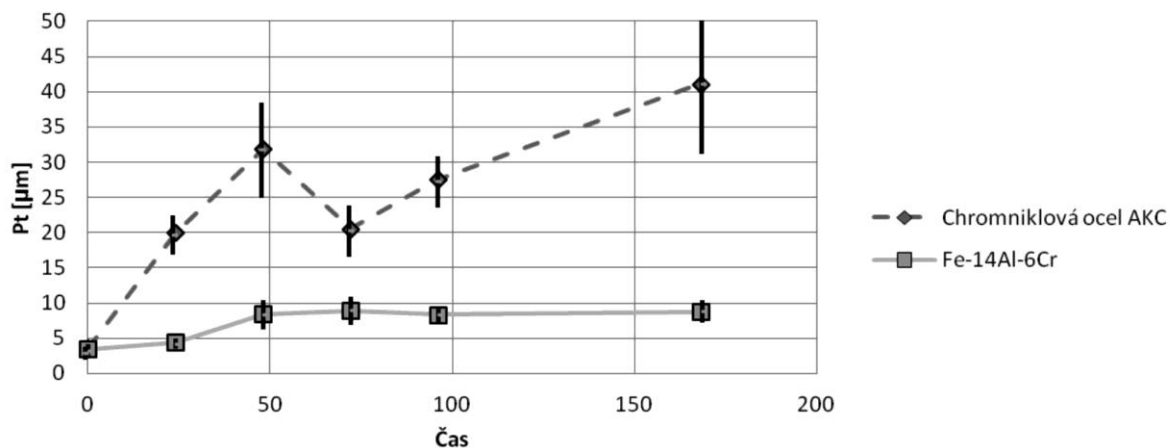
Slitina		Chemické složení					
		Al	C	Cr	Mn	Ni	Fe
Fe-14Al-6Cr	hm. %	14,20	0,02	5,63	max. 0,45	-	Bal.
	at. %	25,41	0,08	5,23	max. 0,40	-	Bal.
AKC (EN X8CrNi25-21)	hm. %	-	max. 0,20	24,00–26,00	1,50	19,00–22,00	Bal.
	at. %	-	max. 0,92	25,37–27,48	1,50	17,79–20,60	Bal.

Tab. 5.2 Chemické složení sodnovápenatého skla v hm. %

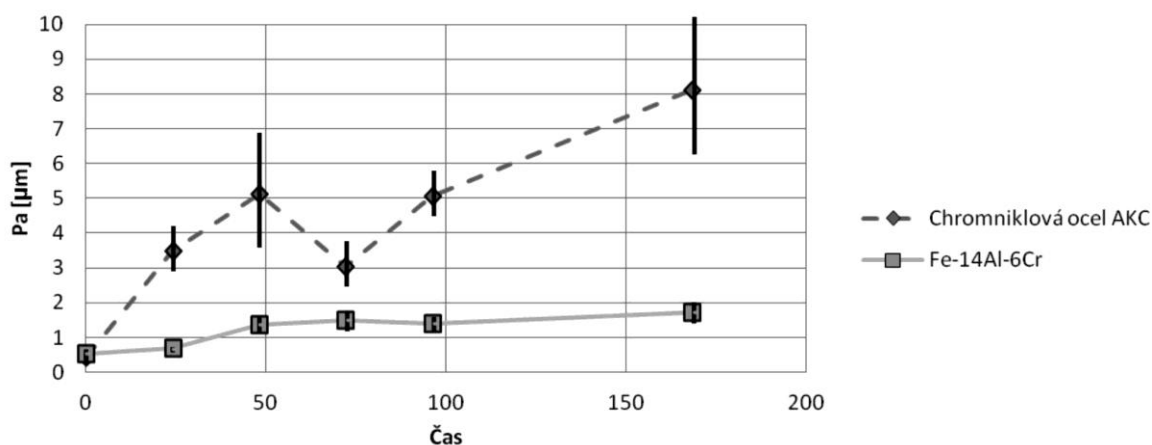
Oxid	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Sodnovápenaté sklo v hm. % (bezbarvé transparentní obalové sklo)	74,03	1,67	0,05	10,08	0,54	0,62	12,68	0,13

V grafech na Obr. 5.2 až Obr. 5.8 jsou ukázány výsledky analýzy křivek rozhraní mezi slitinou a okolím po korozním působení skloviny. Použity jsou průměrné hodnoty z 9 analýz na každém vzorku pro daný čas expozice v roztavené sklovině (12 vzorků, 108 analýz), zobrazeny jako bod. Vypočtené standardní odchylky jsou v grafech znázorněny jako svislá čára.

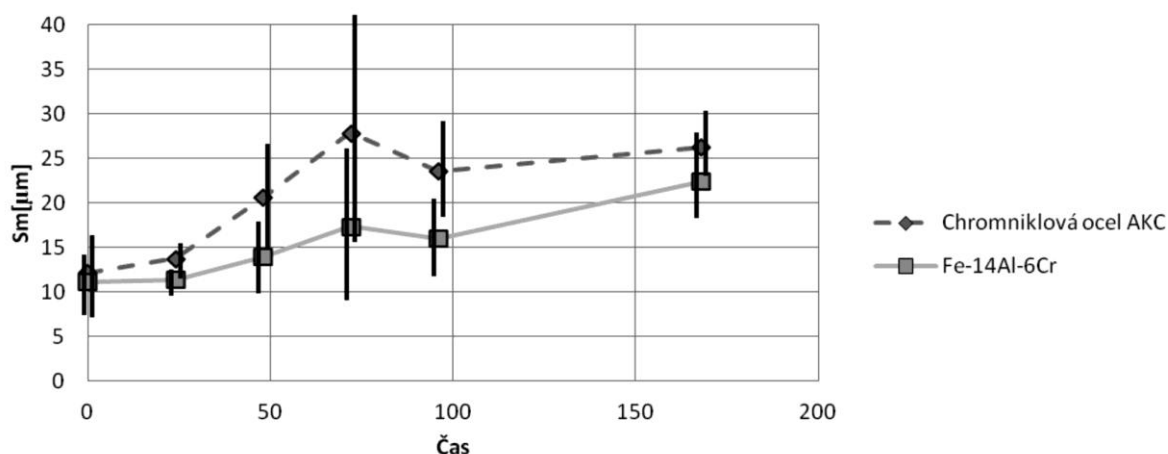
Obr. 5.2 Průměrná hodnota směrodatné odchylky profilu *Std*, jako funkce doby expozice slitiny v roztavené sklovině při teplotě 1 200 °C



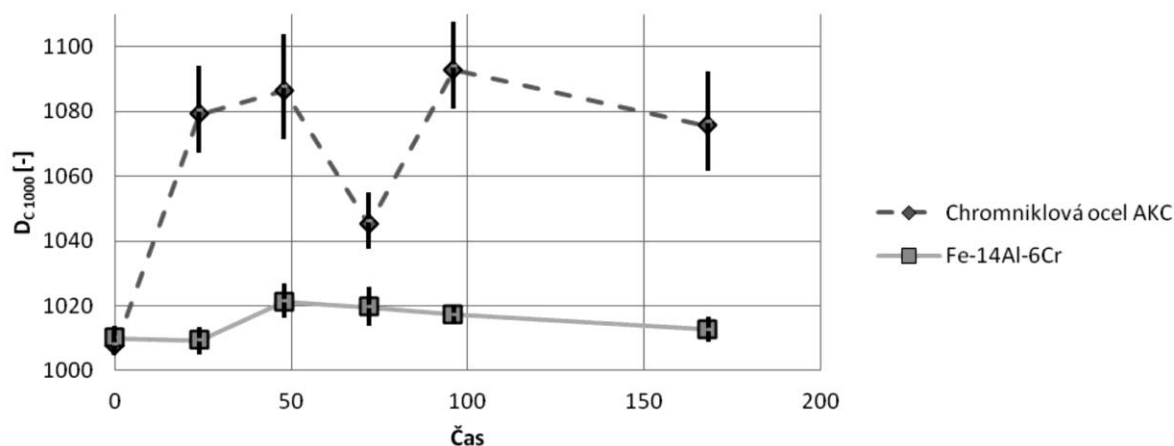
Obr. 5.3 Průměrná hodnota maximální výšky profilu P_t (s uvedením směrodatné odchylky), jako funkce doby expozice slitiny v roztavené sklovině při teplotě 1 200 °C



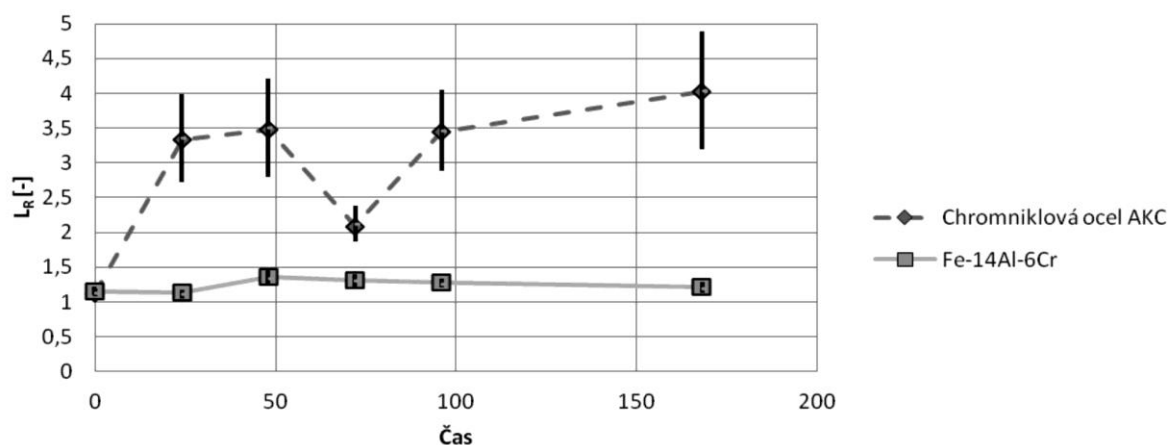
Obr. 5.4 Průměrná hodnota střední aritmetické úchyly profilu P_a (s uvedením směrodatné odchylky), jako funkce doby expozice slitiny v roztavené sklovině při teplotě 1 200 °C



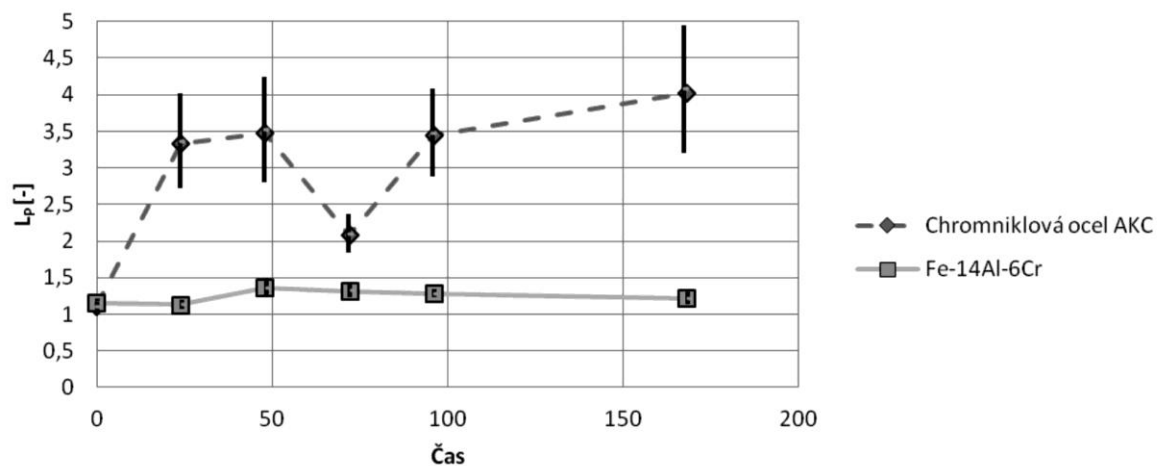
Obr. 5.5 Průměrná hodnota střední rozteče nerovnosti profilu S_m (s uvedením směrodatné odchylky), jako funkce doby expozice slitiny v roztavené sklovině při teplotě 1 200 °C



Obr. 5.6 Průměrná hodnota odhadnuté fraktální dimenze (s uvedením směrodatné odchylky), tzv. obvodové dimenze D_{C1000} , jako funkce doby expozice slitiny v roztavené sklovině při teplotě 1 200 °C



Obr. 5.7 Průměrná hodnota relativní délky L_R (s uvedením směrodatné odchylky), jako funkce doby expozice slitiny v roztavené sklovině při teplotě 1 200 °C



Obr. 5.8 Průměrná hodnota poměrné délky L_P (s uvedením směrodatné odchylky), jako funkce doby expozice slitiny v roztavené sklovině při teplotě 1 200 °C

Hodnocení výsledků má, na základě vyvinuté metodiky, dva kroky. V prvním kroku je stanoven pouze omezený počet parametrů (z celkového počtu 22), které poskytují různorodé informace o křivce rozhraní, jak již bylo dříve uvedeno. Použitý Pearsonův korelační koeficient pro stanovení míry lineární korelace je pro vybrané parametry uveden v Tab. 5.3. Například korelace mezi parametry směrodatnou odchylkou Std , střední aritmetické úchyly profilu Pa a maximální výškou profilu Pt je zřetelná i z porovnání průběhů grafů (Obr. 5.2, Obr. 5.3 a Obr. 5.4). Koreluje také obvodová dimenze D_{c1000} s relativní délkou L_R . Na základě strategie výběru nejmenší korelace (která předpokládá nejmenší souvztažnost) je vybrán jeden parametr pro každou charakteristickou skupinu (s nejnižší korelací s ostatními parametry z jiných skupin). Pro získaná data v tomto experimentu jsou vybrány parametry: maximální výška profilu Pt (parametr amplitudy), střední rozteč nerovnosti profilu Sm (parametr frekvence), obvodová dimenze D_{c1000} (parametr složitosti a deformace). Je předpoklad, že tyto tři parametry podávají rozdílné informace o charakteru dat a vytváří tak ucelenou objektivní informaci o křivce rozhraní.

Tab. 5.3 Pearsonův korelační koeficient vybraných parametrů

	Směrodatná odchylka křivky profilu, Std [μm]	Maximální výška profilu, Pt [μm]	Střední úchylna profilu, Pa [μm]	Střední rozteč nerovnosti profilu, Sm [μm]	Obvodová dimenze, D_{c1000} [-]	Poměrná délka, L_P [-]	Relativní délka, L_R [-]
Směrodatná odchylka křivky profilu, Std [μm]	1,00	0,98	0,99	0,50	0,83	0,90	0,90
Maximální výška profilu, Pt [μm]	0,98	1,00	0,96	0,47	0,85	0,88	0,88
Střední úchylna profilu, Pa [μm]	0,99	0,96	1,00	0,49	0,82	0,91	0,91
Střední rozteč nerovnosti profilu, Sm [μm]	0,50	0,47	0,49	1,00	0,30	0,33	0,33
Obvodová dimenze, D_{c1000} [-]	0,83	0,85	0,82	0,30	1,00	0,92	0,92
Poměrná délka, L_P [-]	0,90	0,88	0,91	0,33	0,92	1,00	1,00
Relativní délka, L_R [-]	0,90	0,88	0,91	0,33	0,92	1,00	1,00

V druhém kroku je možné, na základě získaných a vybraných parametrů, učinit tyto závěry: parametr amplitudy, maximální výška profilu Pt (Obr. 5.3) ukazuje hloubku korozního napadení kovového povrchu sklovinou. Průměrná hloubka křivky rozhraní slitiny Fe-14Al-6Cr roste pomalu až na 168 hodin, protože aluminid železa se pomalu a rovnoměrně rozpouští v roztaveném skle [104, 108]. Naproti tomu u oceli AKC (EN X8CrNi25-21) průměrná hloubka křivky rozhraní roste ze surového stavu až po dobu expozice 48 hodin

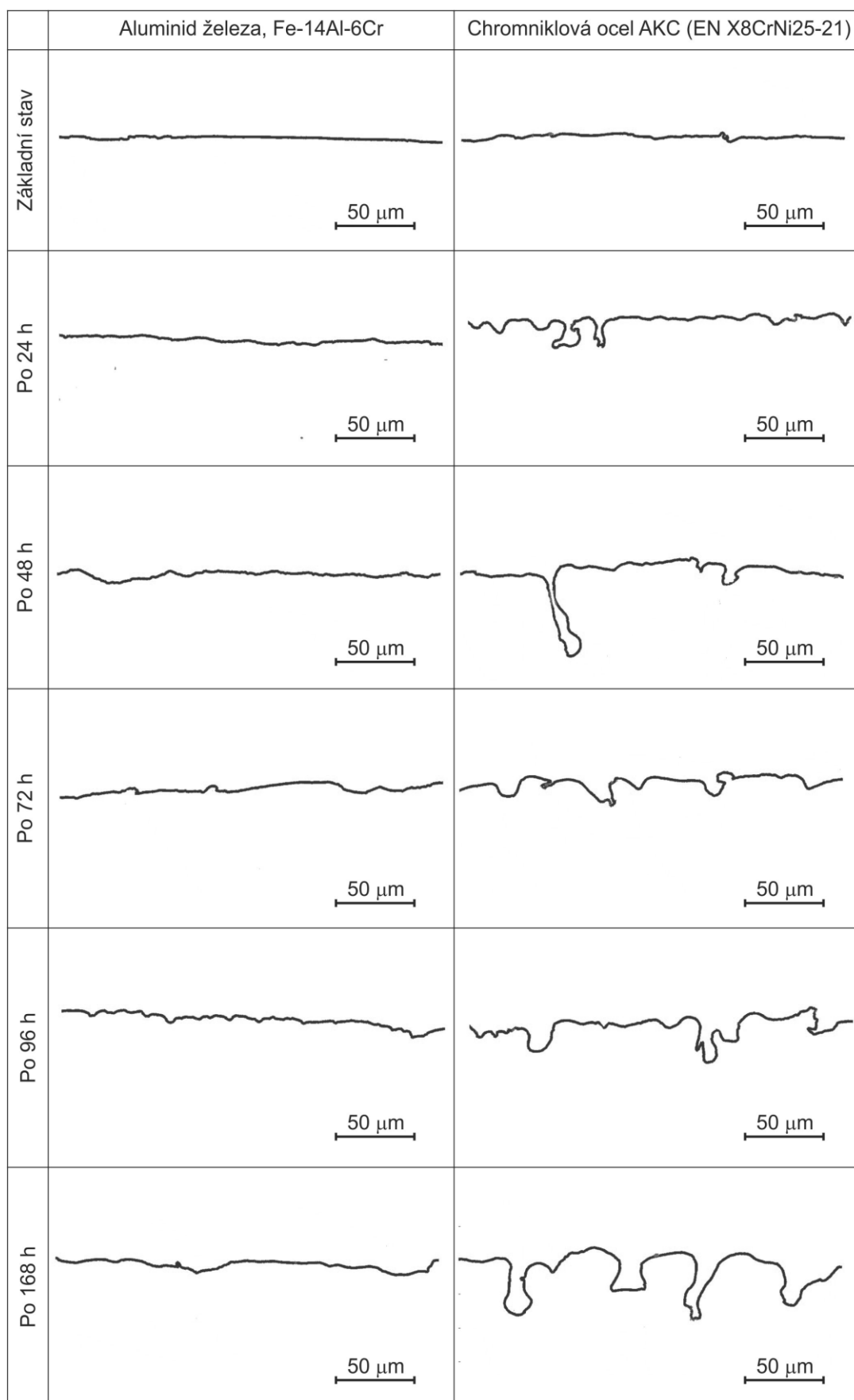
(Obr. 5.9). Po 72 hodinách je zřejmé, že koroze vstupuje méně hluboko do povrchu oceli. Neznamená to však zvýšení odolnosti proti korozi, ale dochází k rovnoměrnějšímu a intenzivnějšímu rozpouštění slitiny sklovinou, což dokládá další metodika hodnocení korozní odolnosti – změna hmotnosti vzorků (Obr. 5.10). Zvýšenou intenzitu rozpouštění dokládají hodnoty úbytků hmotnosti po 48 hod. [108]. Maximální hloubka korozního napadení je u AKC oceli po 168 hodinách, což potvrzují i data z hodnocení úbytků změnou hmotnosti vzorků, Obr. 5.10.

Parametr frekvence, střední rozteč nerovnosti povrchu S_m (Obr. 5.5) ukazuje rozestupy mezi vrcholky křivek rozhraní. Parametr popisuje frekvenci vlnění křivky rozhraní po korozi, tedy kolik vlnových délek může být pozorováno na povrchu v daném rozsahu projekční délky křivky rozhraní. Pro obě slitiny se parametr prodlužuje až k 72 hodinám, následně při 96 hodinách v obou případech klesá, aby na 168 hodinách opět stoupl. Frekvence je spojena s mechanismem koroze.

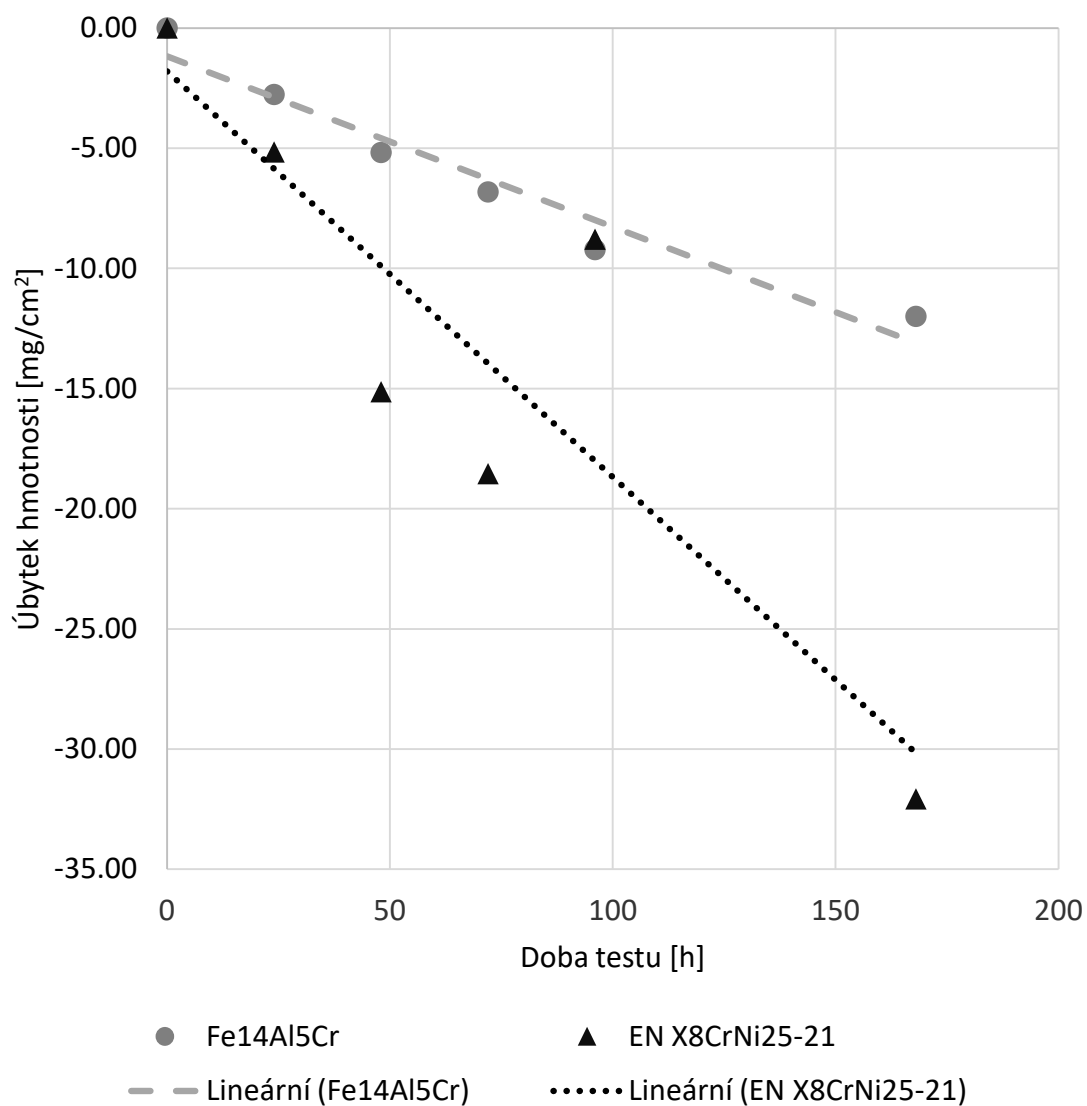
Parametr složitosti a deformace, obvodová dimenze D_{c1000} (Obr. 5.6) kvalifikuje úroveň komplexnosti křivky. V případě slitiny Fe-14Al-6Cr vzrůstá průměrná složitost povrchu od 24 do 48 hodin a pak se pomalu snižuje. Na druhou stranu, průměrná povrchová složitost povrchu AKC oceli se významně zvyšuje od surového stavu během korozního napadení až na 48 hodin, poté klesá a po 72 hodinách narůstá na maximum. Po 96 hodinách byl pozorován mírný pokles obvodové dimenze. Snížení hodnoty obvodové dimenze na 72 hodinách pravděpodobně souvisí s rovnoměrnějším průběhem koroze (což naznačuje i parametr maximální výšky profilu P_t). Pro pochopení korozního mechanismu AKC oceli je nutné provést další analýzy.

V případě grafu Obr. 5.10 je hodnota korozního úbytku výrazně nižší u oceli AKC po 96 hodinách. Po tomto čase byla sklovina více provázána se slitinou AKC a bylo obtížné sklo oddělit od povrchu slitiny, jak dokládá Obr. 5.11.

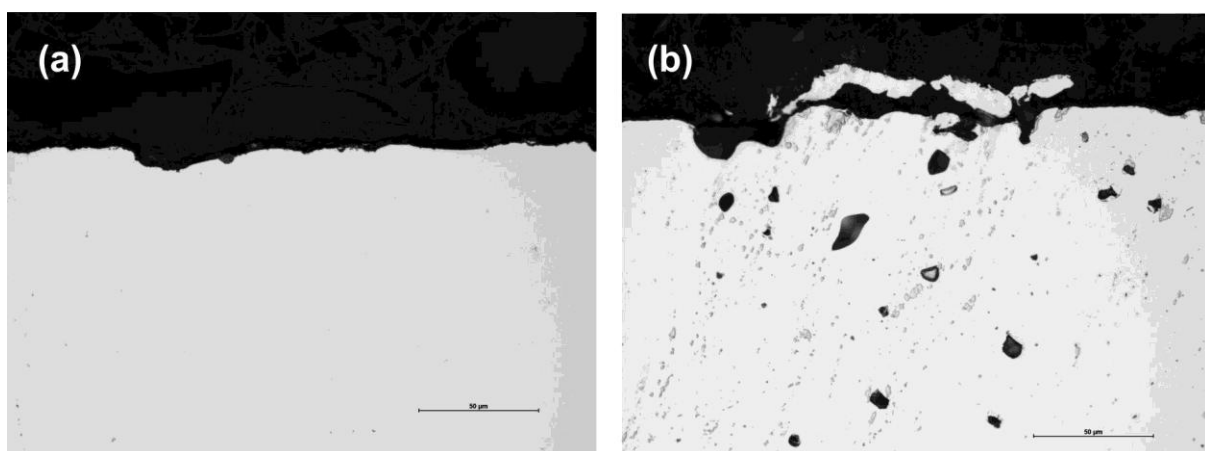
Je zřejmé, že křivky rozhraní aluminidu železa Fe-14Al-6Cr po korozi jsou hladší a méně složitější, jsou velice kompaktní a málo porušené. Na základě dat z měření korozního úbytku lze konstatovat, že odolnost aluminidu železa Fe-14Al-6Cr je proti korozi vyšší než korozní odolnost oceli AKC (EN X8CrNi25-21). Austenitická AKC ocel vykazovala korozní výčnělky a také dutiny pod povrchem pravděpodobně kvůli mezikrystalové korozi. Toto tvrzení by však mělo být podpořeno strukturní a fázovou analýzou. Aluminid železa Fe-14Al-6Cr by mohl nahradit drahé žáruvzdorné oceli (AKC) s vysokým obsahem Cr a Ni používané na konstrukční prvky v roztavené sodnovápenaté sklovině do teplot 1 200 °C.



Obr. 5.9 Příklady křivek rozhraní mezi slitinou a okolím (především sklovinou a produkty koroze)



Obr. 5.10 Změna hmotnosti vzorků slitin v závislosti na čase v čiré obalové sklovině při teplotě 1 200 °C



Obr. 5.11 Snímek metalografického výbrusu, porovnání napadení slitiny roztavenou sklovinou: expozice 96 hodin, teplota 1 200 °C: (a) Fe-14Al-6Cr, (b) AKC (EN X8CrNi25-21)

5.1.3 Příklad aplikace: odolnost slitin vůči atmosféře

Kapitola vychází z recenzovaného textu [P5] uvedeného v příloze.

Aluminidy železa jsou studovány také jako potenciální slitiny pro konstrukční aplikace při vysokých teplotách. Důvodem pro jejich výběr je, že binární slitiny Fe-Al mají velmi dobrou odolnost proti korozi za vysokých teplot [109, 110]. Binární slitiny Fe-Al jsou často legovány ke zlepšení mechanických vlastností, zejména při vysokých teplotách. Avšak legování může mít nepříznivý účinek na korozní odolnost. Například obsah zirkonia vyšší než 0,1 % způsobuje vznik oxidových výčnělků v důsledku preferenčního napadení precipitátů bohatých na Zr [111–113]. V případě legování tantalem bylo pozorováno štěpení oxidové vrstvy, pravděpodobně proto, že při teplotě vyšší než 900 °C vznikly pod okujemi pásy Fe₂Ta. Je tak zřejmé, že by měla být zkoušena a analyzována vysokoteplotní oxidace a korozní odolnost těchto slitin.

Aluminidy železa byly například testovány na korozní odolnost vůči atmosféře při vysokých teplotách (900 až 1 200 °C) v syntetické atmosféře (20,5 % O₂, 79,5 % N₂). Aplikace uvedené metodiky v kap. 5.1.1 je prezentována na porovnání oxidace aluminidů železa Fe-29.7Al-3.8Cr-0.3Zr-0.2C (slitina A) a Fe-26.4Al-2.8Cr-0.2Zr-0.6C (slitina B), jejichž složení je uvedeno v Tab. 5.4 (v atomových procentech). Pro zkoušky oxidace byly dělením elektrickým výbojem (EDM) vyrobeny vzorky o rozměrech 10 x 10 x 1 mm a povrchy vzorků byly jemně broušeny smirkovým papírem o zrnitosti 1 200 (základní stav).

Tab. 5.4 Chemické složení slitin použitých v experimentu

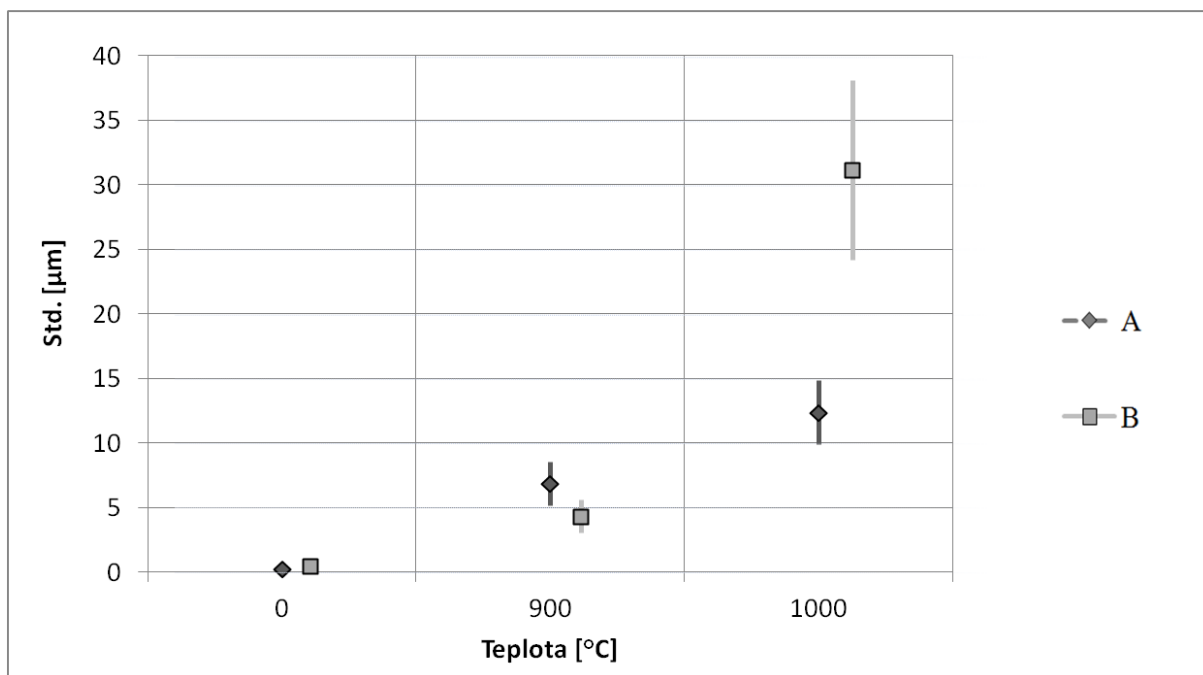
Slitina			Chemické složení				
			Al	C	Cr	Zr	Fe
A	Fe-29.7Al-3.8Cr-0.3Zr-0.2C	at. %	29,7	0,2	3,8	0,3	Bal.
B	Fe-26.4Al-2.8Cr-0.2Zr-0.6C	at. %	26,4	0,6	2,8	0,2	Bal.

Slitiny A a B byly vystaveny účinkům syntetické atmosféry po dobu 1 000 hodin v teplotním rozsahu 900 až 1 200 °C. Po oxidačním testu byly vzorky pečlivě vyříznuty a zapouzdřeny do vodivé pryskyřice. Pak byly vzorky broušeny a leštěny diamantovou suspenzí, v posledním kroku leštěny 0,05 µm koloidním oxidem křemičitým. Podobně jako v předchozí kapitole (kap. 5.1.2) byly analyzovány snímky metalografických výbrusů z mikroskopu. Opět bylo provedeno snímkování na několika místech daného vzorku (10 pozic).

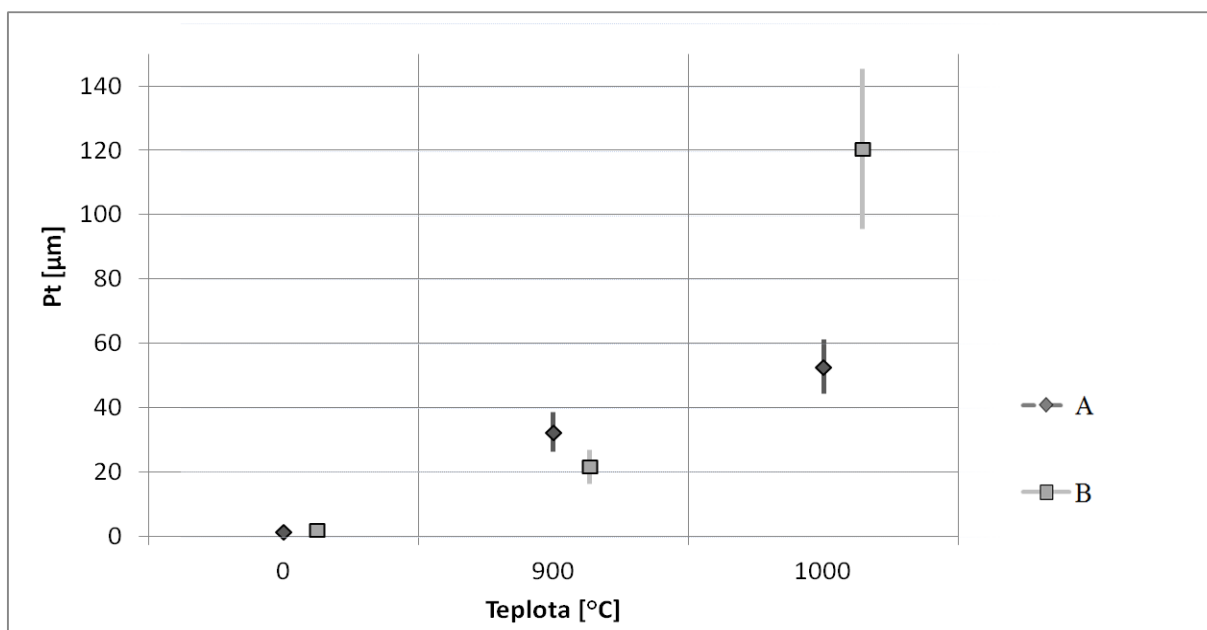
Korozní chování slitin A a B a analýza změny chemického složení v blízkosti povrchu jsou shrnuty v publikaci [111]. Následující text je zaměřen na výsledky použití metodiky pro stanovení a kvantifikaci charakteru oxidačního napadení uvedených slitin, zahrnující také fraktální analýzu. Nejprve je prezentováno porovnání účinku chemického složení slitin A a B na odolnost proti oxidaci při teplotách 900 a 1 000 °C (se zahrnutím základního stavu). Následně je ukázáno použití metodiky na vývoj korozního napadení slitiny B v závislosti na teplotě (od 900 do 1 200 °C, se zahrnutím základního stavu).

5.1.3.1 Porovnání vlivu oxidace slitin A a B

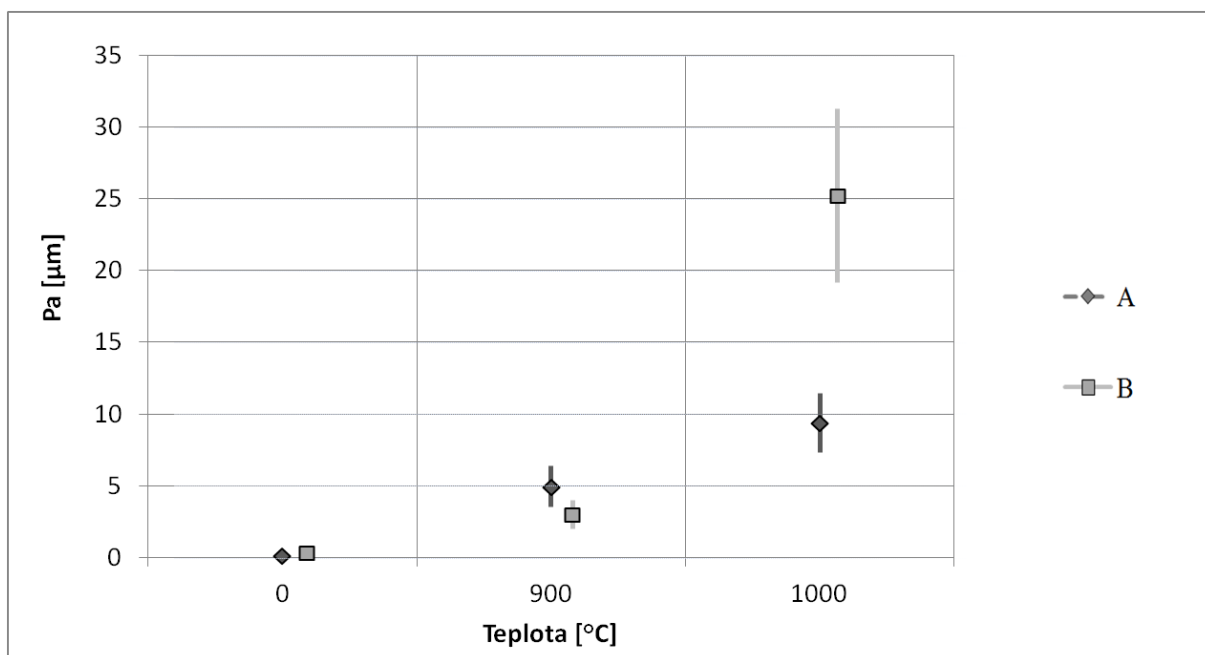
V grafech na Obr. 5.12 až Obr. 5.18 jsou zobrazeny výsledky analýzy křivek rozhraní mezi slitinou (A a B) a okolím po korozním působení syntetické atmosféry. Průměrné hodnoty byly vypočteny z 10 křivek rozhraní pro každý vzorek a v grafech jsou vyznačeny jako body. Vypočtené standardní odchylky jsou v grafech znázorněny jako svislá čára.



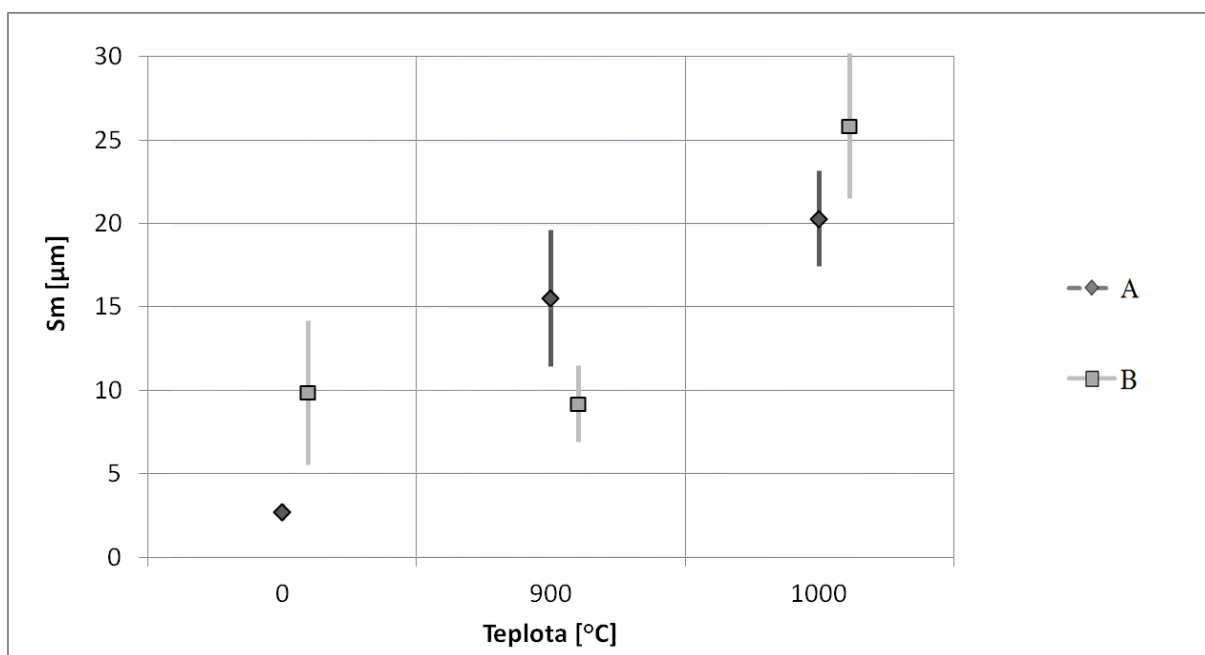
Obr. 5.12 Průměrná hodnota směrodatné odchylky profilu Std , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



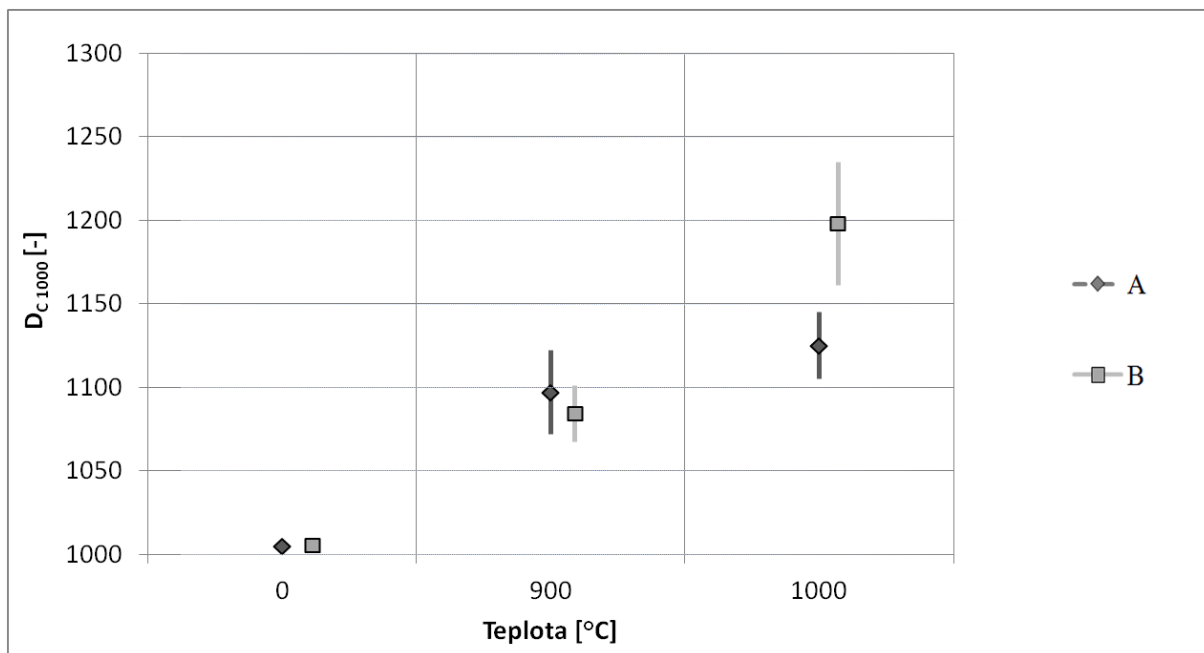
Obr. 5.13 Průměrná hodnota maximální výšky profilu Pt , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



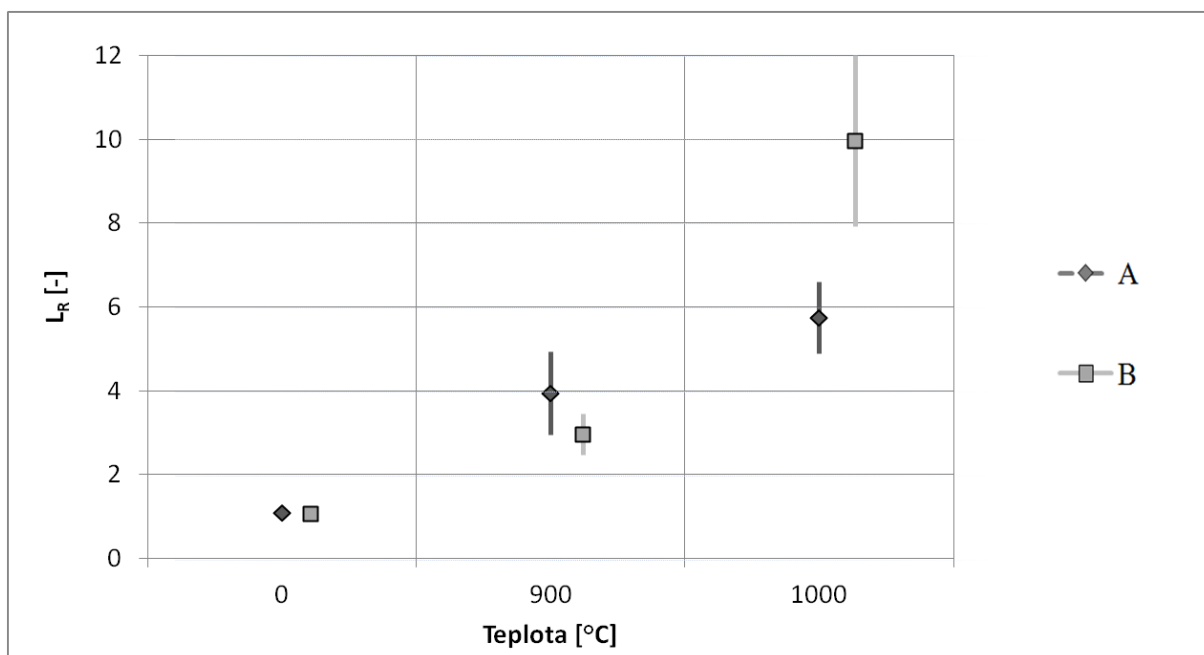
Obr. 5.14 Průměrná hodnota střední aritmetické úchyly profilu Pa , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



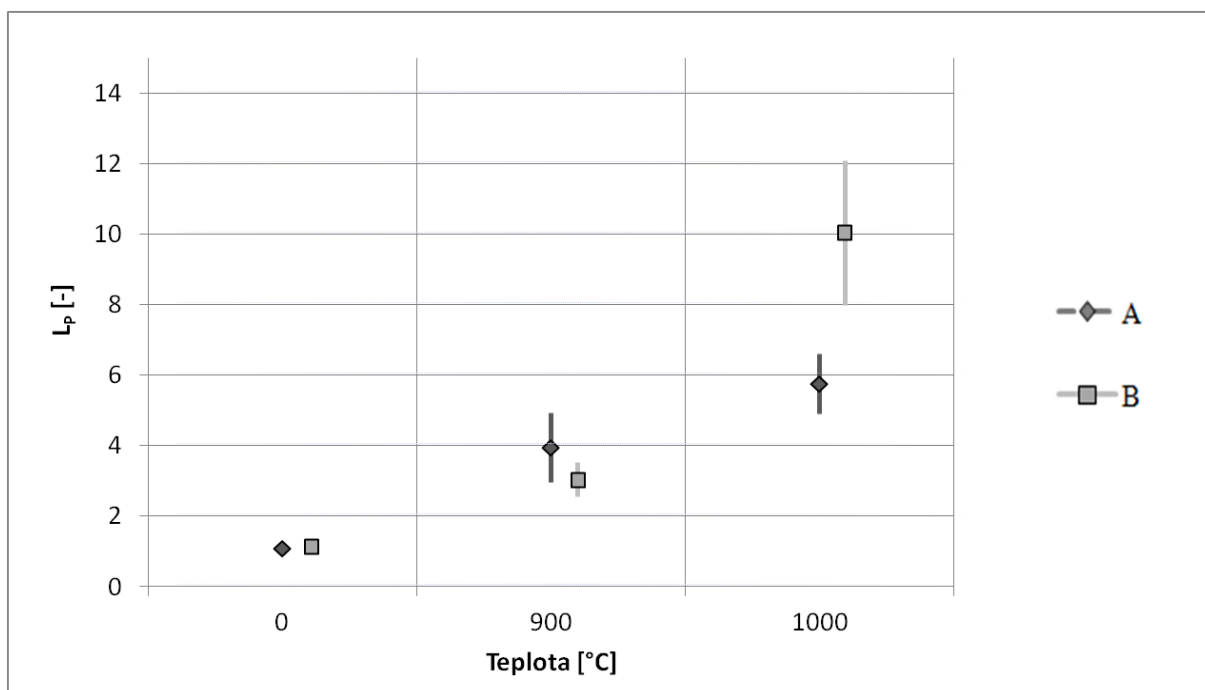
Obr. 5.15 Průměrná hodnota střední rozteče nerovnosti profilu Sm , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



Obr. 5.16 Průměrná hodnota odhadnuté fraktální dimenze, tzv. obvodové dimenze $D_{C 1000}$, jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin

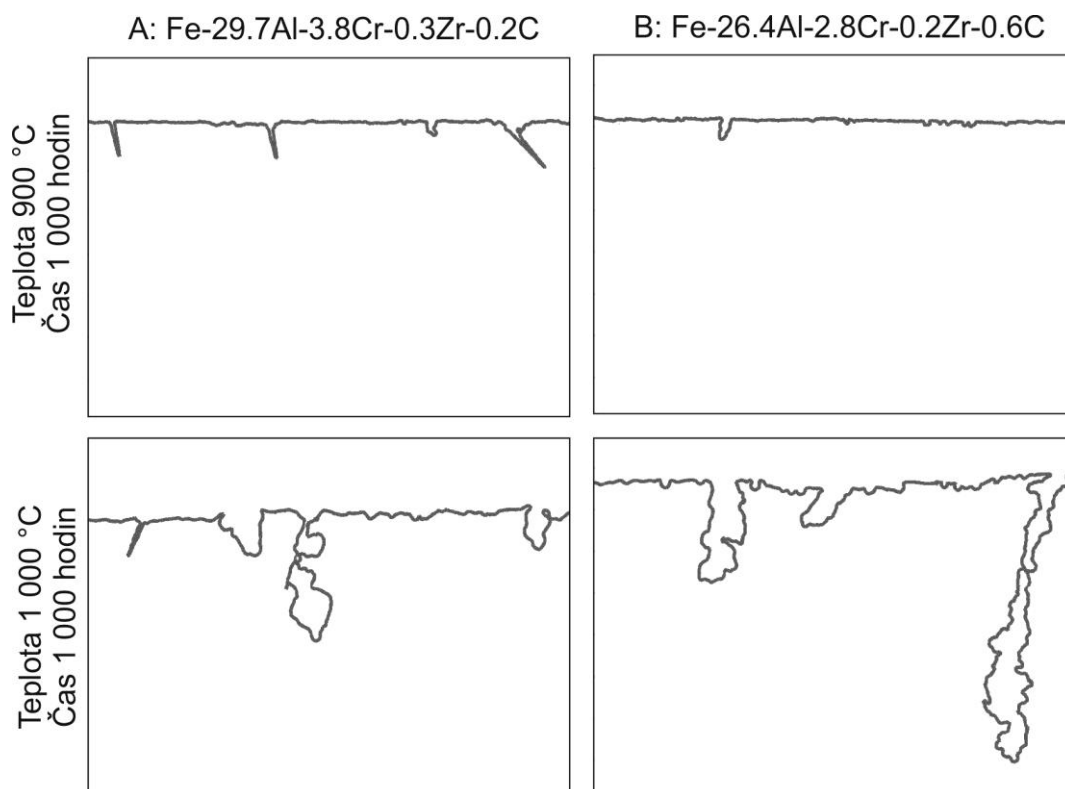


Obr. 5.17 Průměrná hodnota relativní délky L_R , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



Obr. 5.18 Průměrná hodnota poměrné délky L_P , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin

Drsnost vzorků před oxidační zkouškou byla způsobena broušením jejich povrchu. Během oxidace vzorků byl účinek broušení potlačen a účinek vysokoteplotní oxidace se projevil na zvlnění povrchu zejména při 1 000 °C, Obr. 5.19.



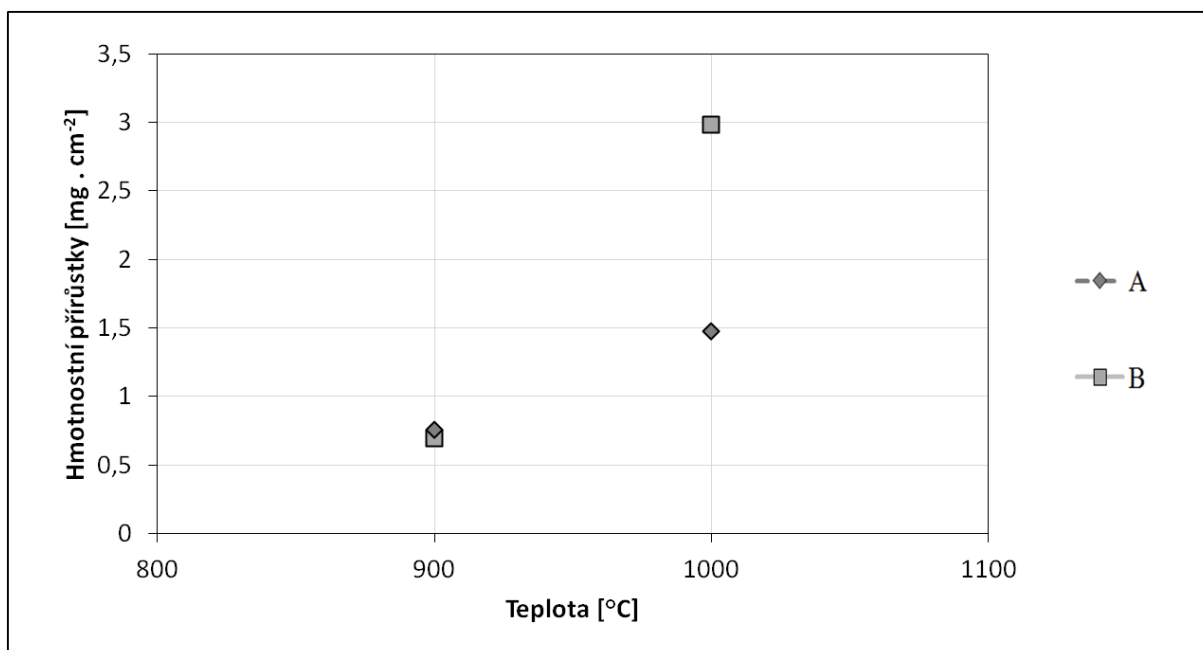
Obr. 5.19 Příklad křivek rozhraní mezi slitinou a okolím (především produkty koroze), zvětšení 500×

Pearsonovy korelační koeficienty pro vyhodnocení získaných parametrů byly vypočteny metodou popsanou v předchozích kapitolách. Koeficienty jsou uvedeny v Tab. 5.5. Některé parametry lineárně korelují s ostatními a lze předpokládat, že poskytují podobné informace o datech. Lze tak specifikovat vhodné parametry pro vyhodnocení tohoto typu dat: střední aritmetická úchylka profilu Pa (parametr amplitudy), střední rozteč nerovnosti povrchu Sm (parametr frekvence), obvodová dimenze D_{c1000} (parametr složitosti a deformace). Předpokládá se, že tyto tři parametry poskytují různé informace o drsnosti povrchu.

Tab. 5.5 Pearsonův korelační koeficient vybraných parametrů

	Směrodatná odchylka křivky profilu, Std [μm]	Maximální výška profilu, Pt [μm]	Střední úchylka profilu, Pa [μm]	Střední rozteč nerovnosti profilu, Sm [μm]	Obvodová dimenze, D_{c1000} [-]	Poměrná délka, L_P [-]	Relativní délka, L_R [-]
Směrodatná odchylka křivky profilu, Std [μm]	1,00	1,00	1,00	0,63	0,90	0,96	0,96
Maximální výška profilu, Pt [μm]	1,00	1,00	0,99	0,65	0,91	0,96	0,96
Střední úchylka profilu, Pa [μm]	1,00	0,99	1,00	0,62	0,89	0,95	0,95
Střední rozteč nerovnosti profilu, Sm [μm]	0,63	0,65	0,62	1,00	0,62	0,62	0,62
Obvodová dimenze, D_{c1000} [-]	0,90	0,91	0,89	0,62	1,00	0,92	0,92
Poměrná délka, L_P [-]	0,96	0,96	0,95	0,62	0,92	1,00	1,00
Relativní délka, L_R [-]	0,96	0,96	0,95	0,62	0,92	1,00	1,00

Oxidační procesy obou slitin při teplotě 900 °C jsou poněkud odlišné [111]. Na povrchu obou slitin byly pozorovány tenké a přilnavé oxidové okuje, ale slitina A má o něco vyšší hmotnostní přírůstek než slitina B (Obr. 5.20). Tento rozdíl mezi slitinami A a B lze odhalit také pomocí parametrů popisující křivku rozhraní (Obr. 5.12 až Obr. 5.18). V případě slitiny A jsou vyšší hodnoty Pa a D_{c1000} způsobeny především přítomností trhlin, které jsou pozorovány na povrchu [111] (Obr. 5.19). Trhliny jsou oxidovány, tudíž tvorba trhlin se týká zahřívání vzorků v syntetické atmosféře. Kromě trhlin byly také pozorovány oxidové výčnělky. Na druhé straně je průměrná vzdálenost mezi trhlinami (Sm) slitiny A delší, jelikož jsou trhliny hlubší a užší než malé výčnělky oxidu vytvořené na slitině B. Parametry amplitudy (Pa) a složitosti (D_{c1000}) pro slitiny A jsou o něco vyšší než parametry slitiny B a tyto výsledky jsou v souladu s hodnotami hmotnostního přírůstku, Obr. 5.20.

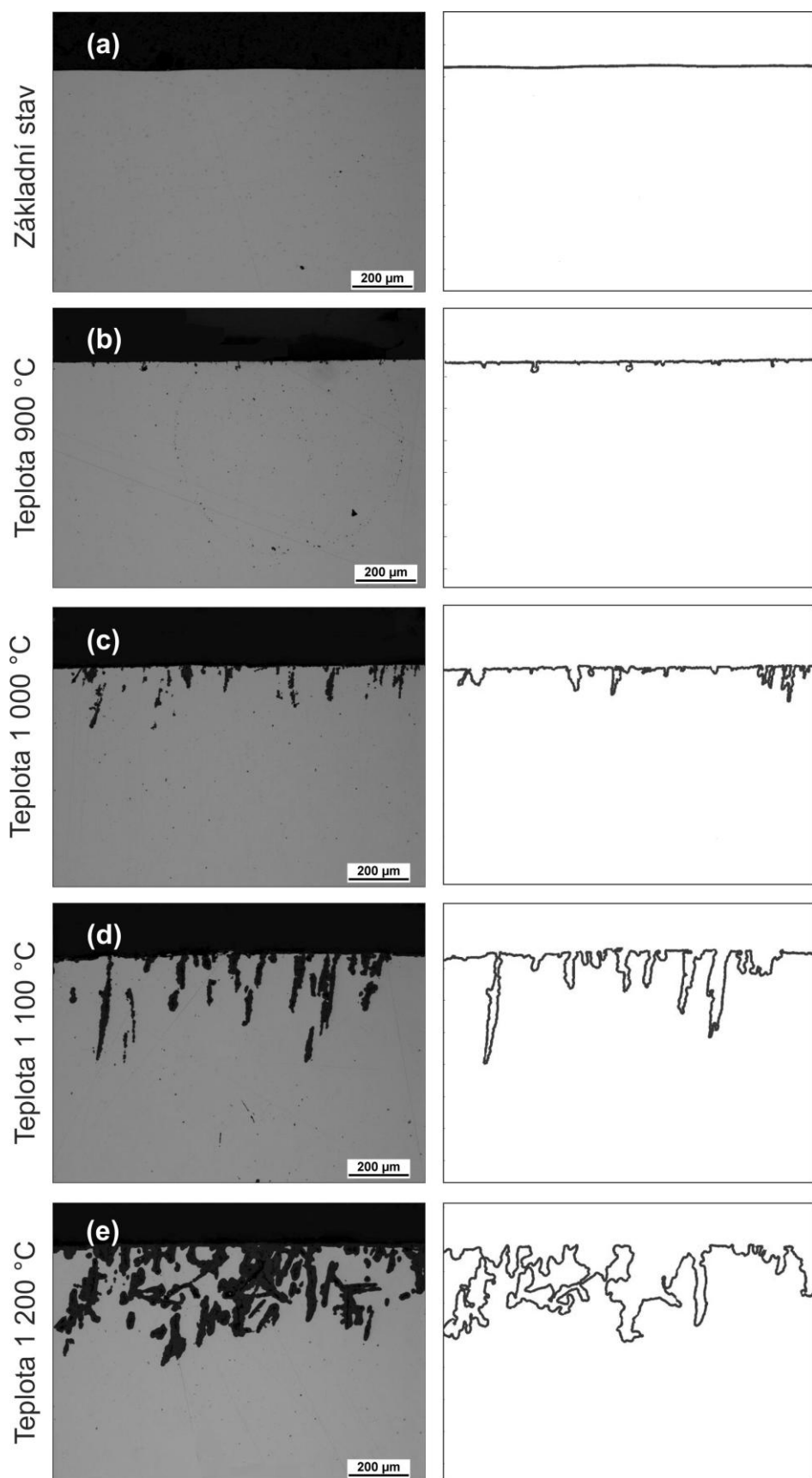


Obr. 5.20 Hmotnostní přírůstky po 1 000 hodinách v závislosti na teplotě

Po oxidaci při 1 000 °C ukazují výsledky průnik oxidace do vzorků obou slitin. Proto hodnocené parametry obou slitin významně vzrostly ve srovnání s oxidací při teplotě 900 °C (Obr. 5.12 až Obr. 5.18). Výsledné parametry křivky rozhraní odhalují rozdíly v odolnosti proti korozi při vysokých teplotách mezi slitinami A a B. Slitina A má nižší hodnoty Pa (Obr. 5.14), protože její oxidační výčnělky jsou menší než oxidové výstupky do slitiny B. Kromě toho nižší hodnota parametru Sm ukazuje, že frekvence výčnělků je nižší u slitiny A než v případě slitiny B, Obr. 5.15. Povrch v počátečním stavu (20 °C) byl broušen, proto hodnoty Sm nejsou nulové. Hodnoty $D_{c\ 1000}$ také potvrzují vyšší oxidační odolnost slitiny A ve vzduchu při vysoké teplotě. V případě slitiny B, oxidy vstupují častěji a hlouběji do povrchu vzorku (Obr. 5.19). Proto jsou všechny získané parametry slitiny B vyšší. Vypočítané parametry křivky rozhraní jsou v souladu s výsledky v [111]. Rozdíly v oxidačním chování jsou způsobeny různou strukturou slitin. Struktura slitiny A se skládá z matrice Fe_3Al s částicemi Lavelsovy fáze, ale slitina B je charakterizována přítomností matrice Fe_3Al a ZrC precipituje namísto Lavelsovy fáze. Ačkoliv oba typy částic bohatých na Zr (Lavelsova fáze, ZrC) jsou přednostně oxidovány, ZrC oxiduje mnohem rychleji než Lavelsova fáze. Kromě toho je u slitiny B typické, že oxidace není omezena na částice ZrC a šíří se do matrice Fe_3Al . Nižší odolnost proti korozi slitiny B je patrná také z nárůstu hmotnosti, viz Obr. 5.20. Oxidace slitiny B tak byla podstatně rychlejší a tloušťka oxidu dosáhla dvojnásobku hodnoty slitiny A po 1 000 hodinách.

5.1.3.2 Vliv teploty na oxidaci slitiny B

Byl také zkoumán vliv teploty na oxidaci slitiny B (Fe-26.4Al-2.8Cr-0.2Zr-0.6C). Parametry drsnosti oxidovaného povrchu byly měřeny před a po vystavení vzorků působení syntetické atmosféry při různých teplotách (900, 1 000, 1 100 a 1 200 °C) za stejnou dobu 1 000 hodin, Obr. 5.21.

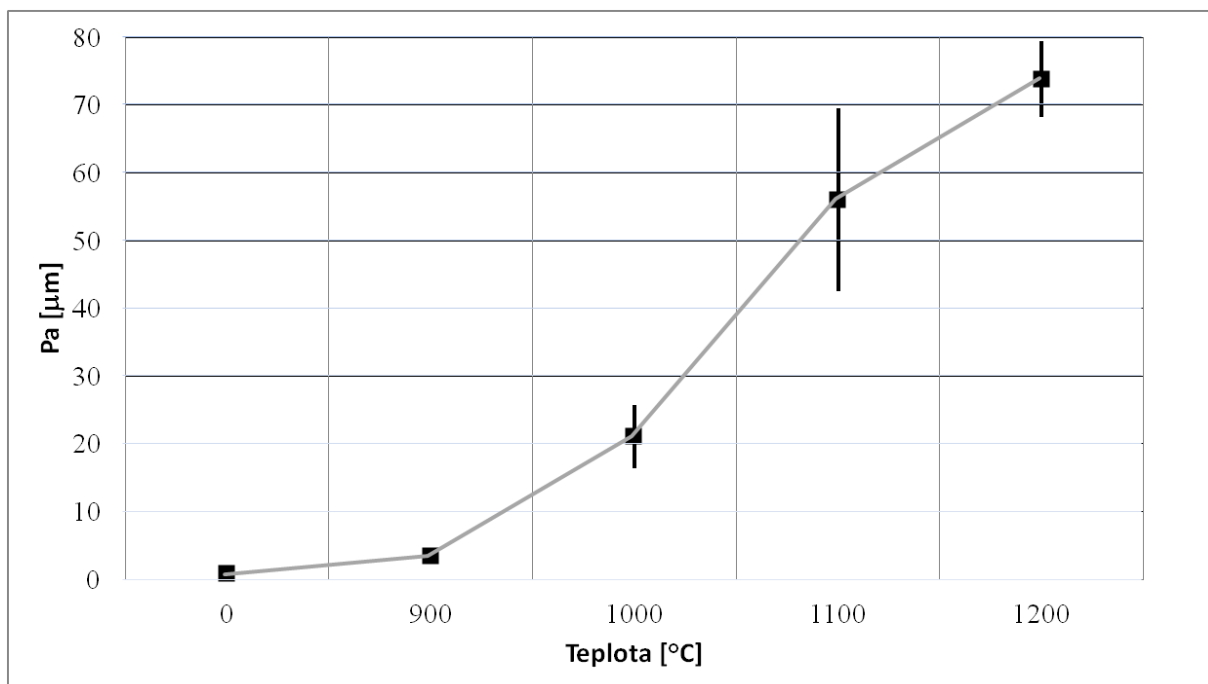


Obr. 5.21 Snímky korodovaného povrchu v šedé škále na metalografických výbrusech při různé teplotě a stejné době expozice (levý sloupec), zvětšeno 100 × a získané křivky rozhraní mezi slitinou a oxidovanou vrstvou (pravý sloupec)

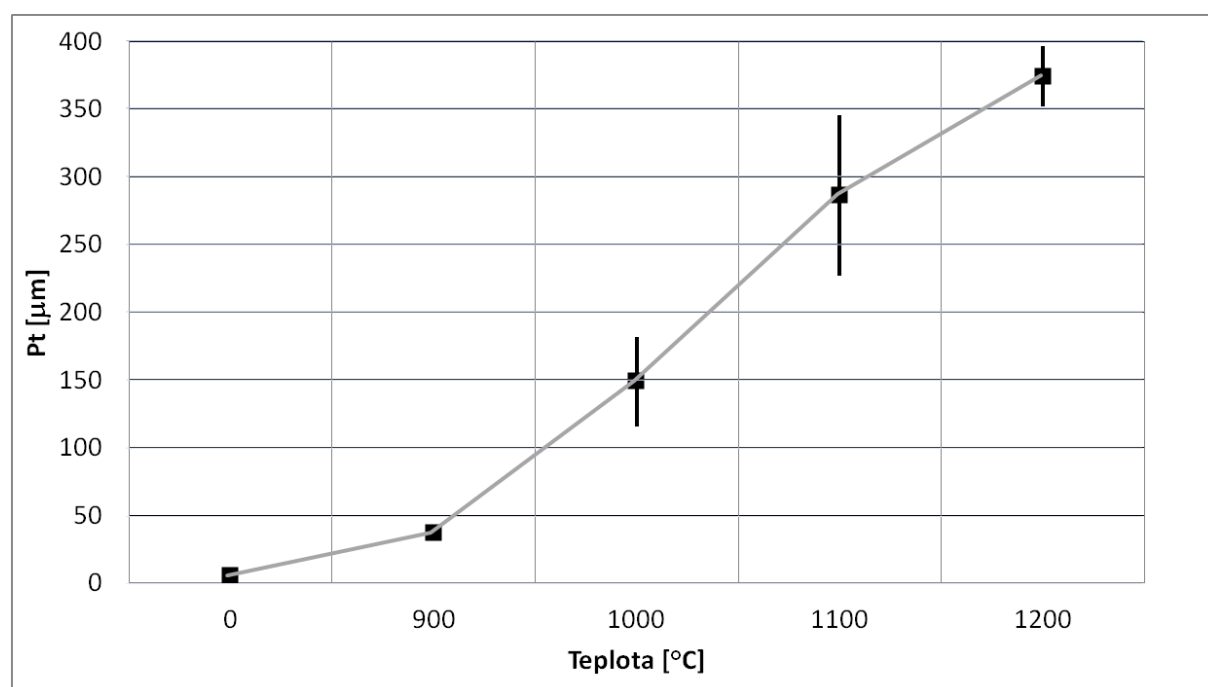
Nejdříve byly specifikovány vhodné parametry pomocí Pearsonových korelačních koeficientů pro hodnocení těchto dat: maximální výška profilu, Pt (parametr amplitudy), střední rozteč nerovnosti profilu, Sm (parametr frekvence), relativní délka, L_R (parametr složitosti a deformace). Výsledky Pearsonovy korelace jsou shrnuty v Tab. 5.6. Vybrané parametry poskytují různé informace o datech a vývoj těchto parametrů je vidět na Obr. 5.22 až Obr. 5.28. Průměrné hodnoty (reprezentované jako body v grafech) a standardní odchylky (reprezentované jako svislá čára) byly vypočteny z 10 křivek rozhraní.

Tab. 5.6 Pearsonův korelační koeficient vybraných parametrů

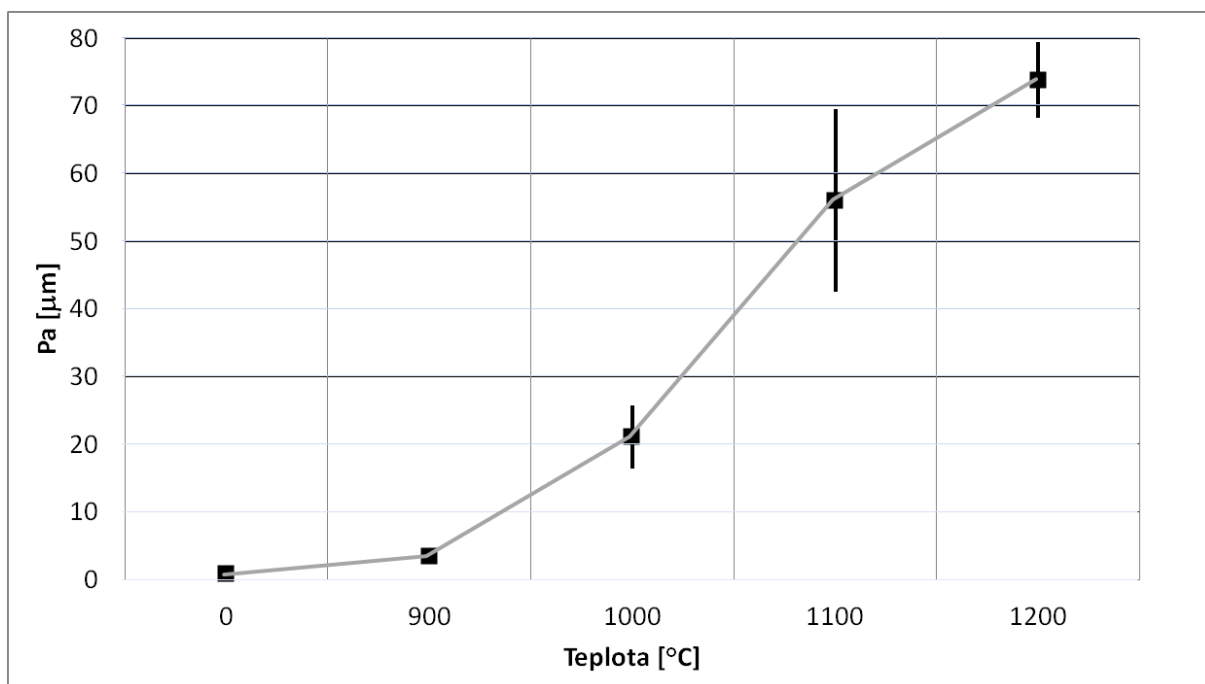
	Směrodatná odchylka křivky profilu, Std [μm]	Maximální výška profilu, Pt [μm]	Střední úchylka profilu, Pa [μm]	Střední rozteč nerovnosti profilu, Sm [μm]	Obvodová dimenze, D_{c1000} [-]	Poměrná délka, L_P [-]	Relativní délka, L_R [-]
Směrodatná odchylka křivky profilu, Std [μm]	1,00	0,98	1,00	0,75	0,93	0,93	0,93
Maximální výška profilu, Pt [μm]	0,98	1,00	0,97	0,74	0,93	0,92	0,92
Střední úchylka profilu, Pa [μm]	1,00	0,97	1,00	0,75	0,92	0,93	0,93
Střední rozteč nerovnosti profilu, Sm [μm]	0,75	0,74	0,75	1,00	0,67	0,59	0,59
Obvodová dimenze, D_{c1000} [-]	0,93	0,93	0,92	0,67	1,00	0,90	0,90
Poměrná délka, L_P [-]	0,93	0,92	0,93	0,59	0,90	1,00	1,00
Relativní délka, L_R [-]	0,93	0,92	0,93	0,59	0,90	1,00	1,00



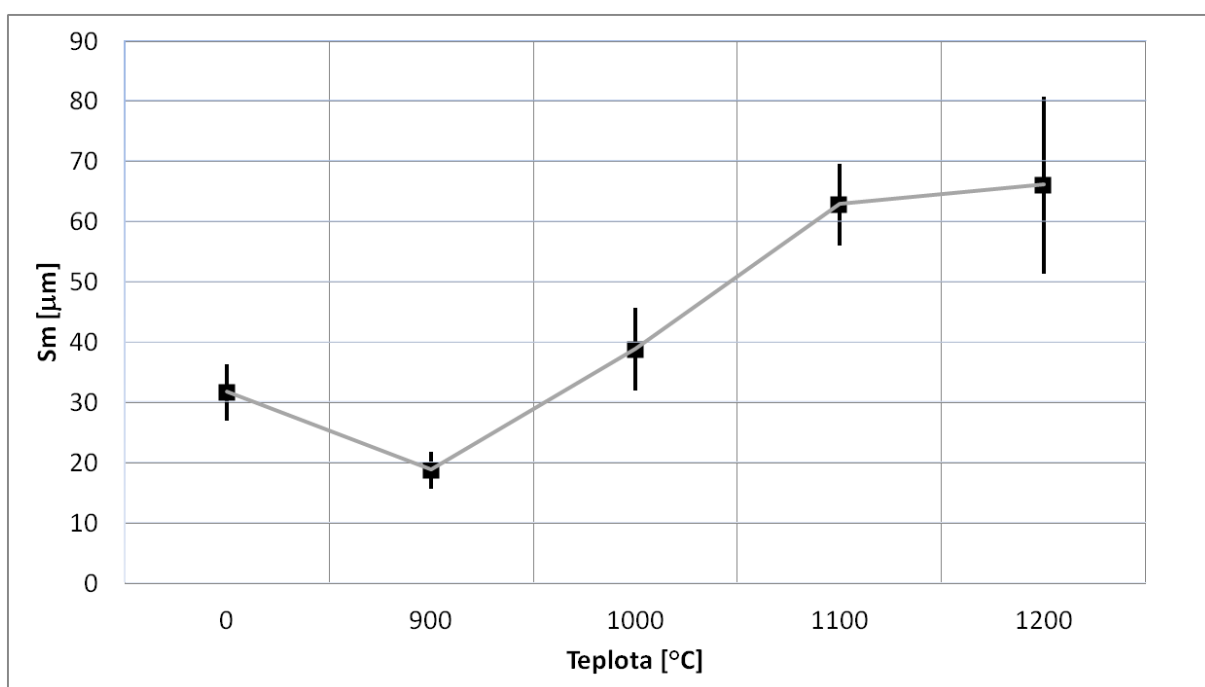
Obr. 5.22 Průměrná hodnota směrodatné odchylky profilu Std , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



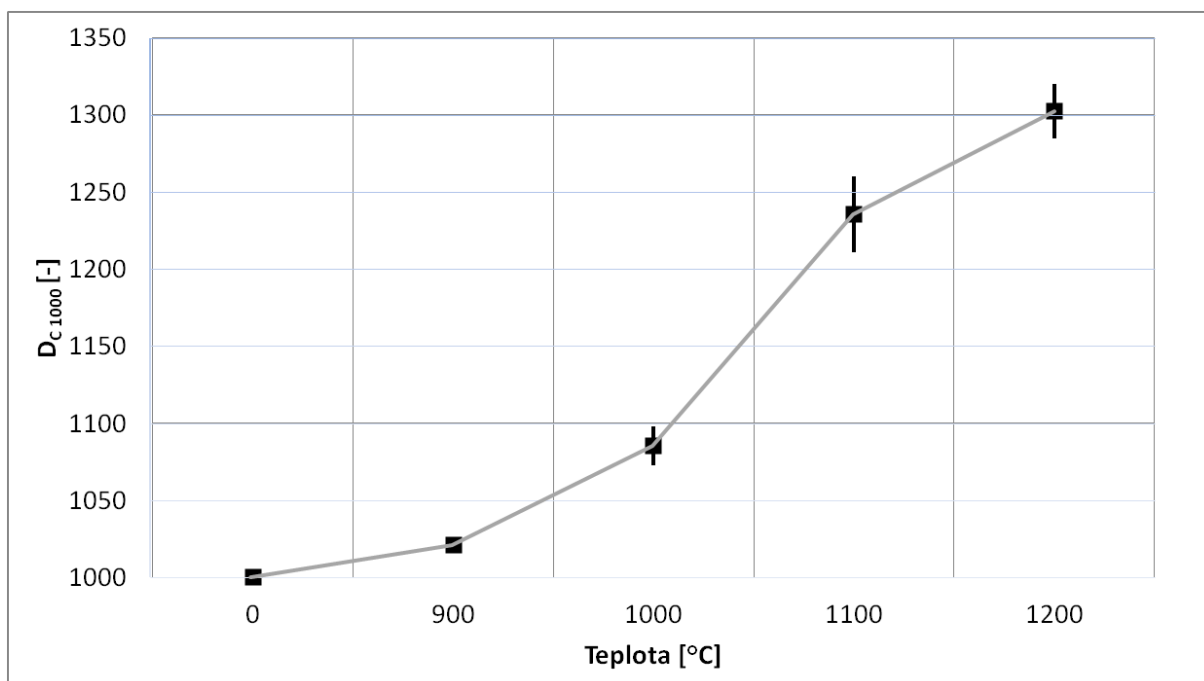
Obr. 5.23 Průměrná hodnota maximální výšky profilu Pt , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



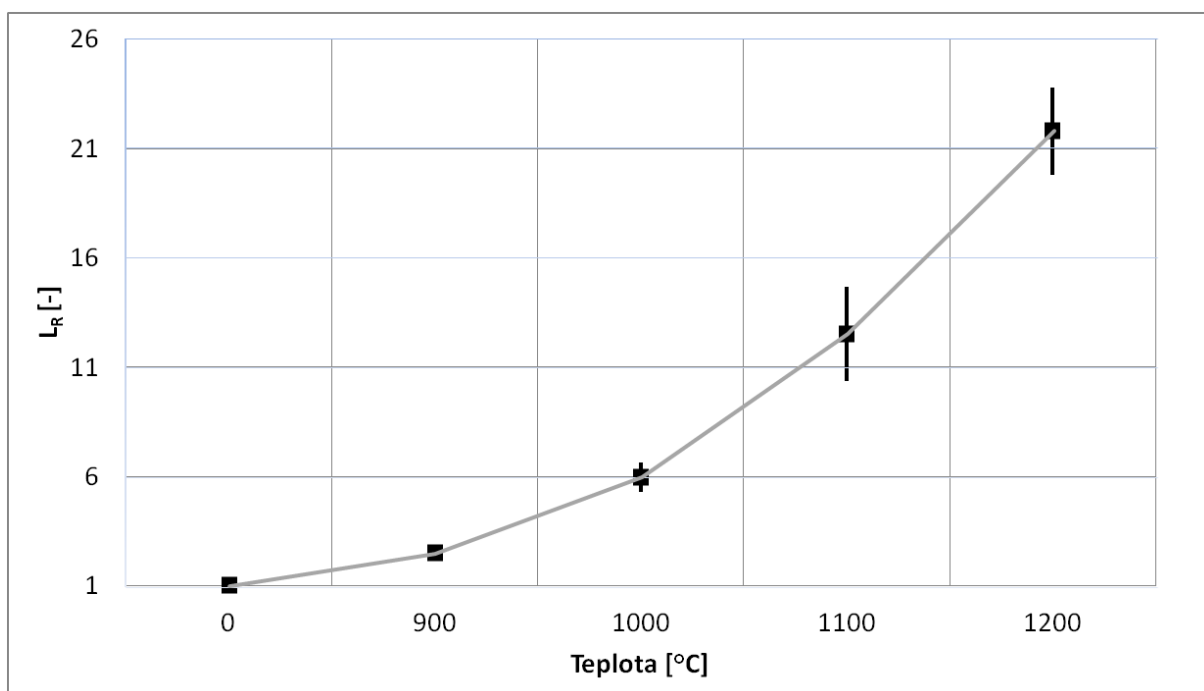
Obr. 5.24 Průměrná hodnota střední aritmetické úchytky profilu P_a , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



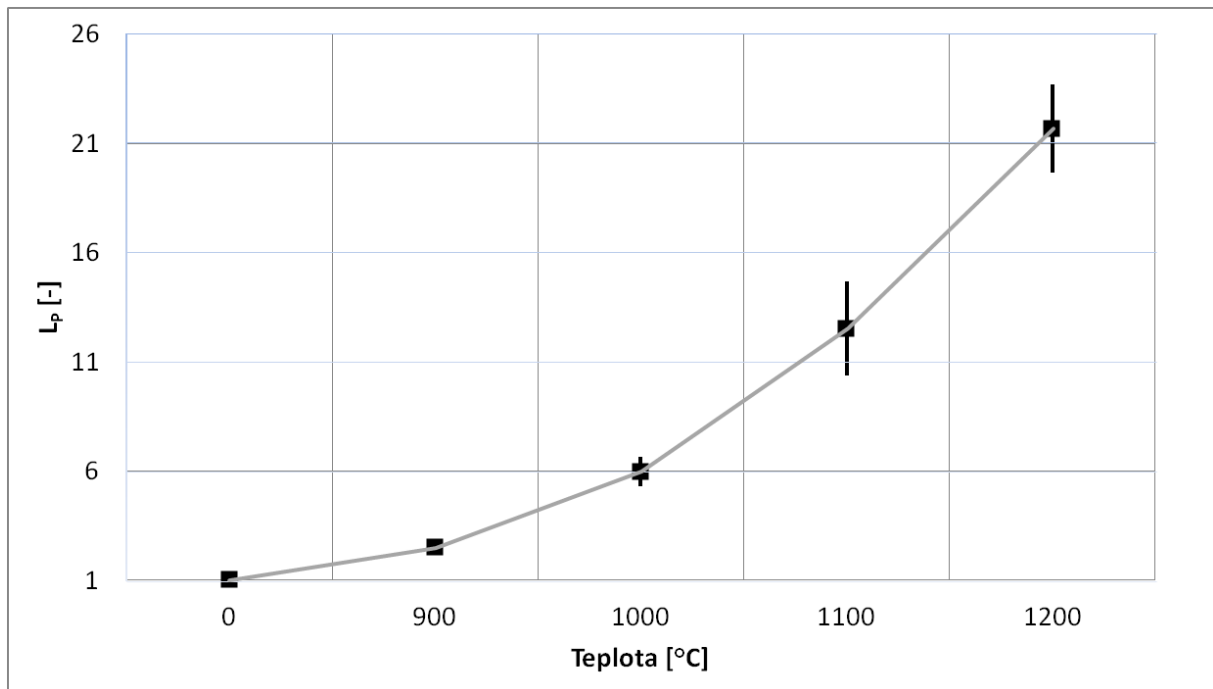
Obr. 5.25 Průměrná hodnota střední rozteče nerovnosti profilu S_m , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



Obr. 5.26 Průměrná hodnota odhadnuté fraktální dimenze, tzv. obvodové dimenze D_{C1000} , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



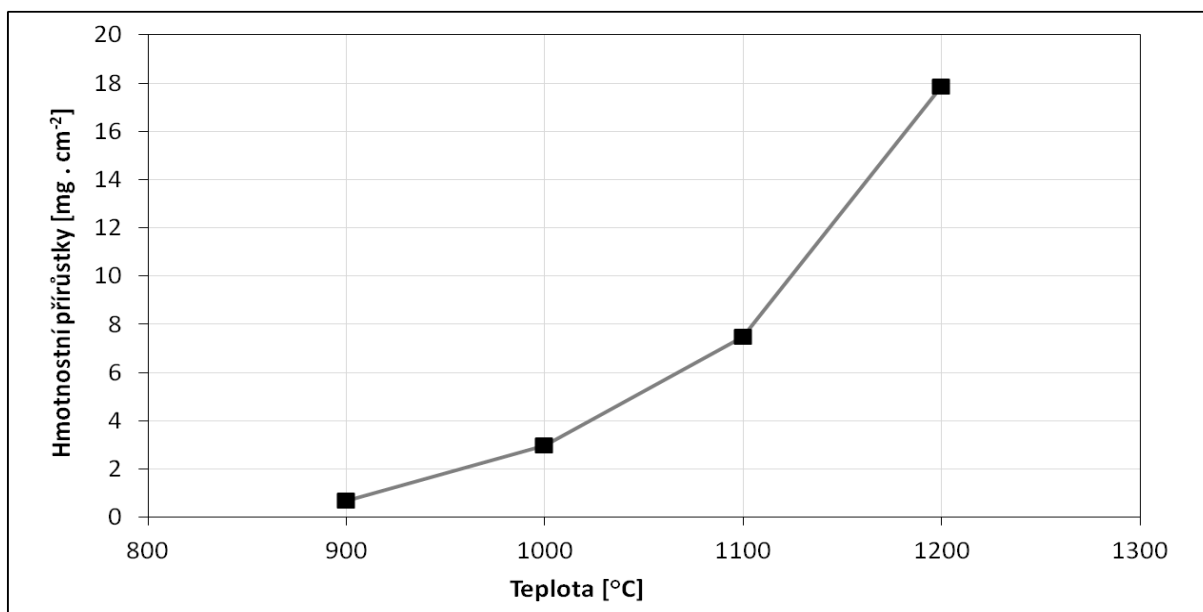
Obr. 5.27 Průměrná hodnota relativní délky L_R , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin



Obr. 5.28 Průměrná hodnota poměrné délky L_p , jako funkce teploty při oxidaci v syntetické atmosféře při době expozice 1 000 hodin

Oxidace při 900 °C způsobila jen velmi mírné zvýšení parametrů amplitudy a parametrů složitosti a deformace. Na druhou stranu se snížil parametr průměrné střední rozteče nerovnosti povrchu (S_m , Obr. 5.25), protože oxidační výstupky jsou hlubší, ale jsou v kratší vzdálenosti než v případě povrchového broušení.

Oxidace při 1 000 °C je charakterizována nárůstem všech pozorovaných parametrů. Z Obr. 5.21 (c) je zřejmé, že oxidace proniká do povrchu slitiny B častěji a hlouběji než po oxidaci při teplotě 900 °C. Oxidové výčnělky jsou štíhlé a hluboké, protože částice bohaté na Zr jsou přednostně oxidovány. Další prohloubení a nárůst počtu výčnělků je způsobeno zvýšením teploty na 1 100 °C. Průměrná vzdálenost S_m ukazuje na nárůst počtu výčnělků a nárůst velikosti výčnělku je definován maximální výškou profilu P_t a relativní délkou L_R . Tvar výčnělku na Obr. 5.21 (d) a analýza provedená v [111] ukazují, že precipitáty ZrC jsou přednostně oxidovány. Na druhou stranu, pro oxidaci při 1 200 °C je typické, že oxidace není omezena na částice ZrC, ale rozšiřuje se do Fe-Al matrice. Oxidace neprobíhá pouze kolmo z povrchu do jádra, ale je rozvětvená, Obr. 5.21 (e). Rozvětvení oxidace dobře odráží parametr relativní délky L_R , kdy se po oxidaci při 1 200 °C hodnota relativní délky opět výrazně zvýšila, zatímco růst parametrů P_a a S_m zpomalil. Nárůst relativní délky dobře koresponduje s hmotnostním přírůstkem, který je uveden v grafu na Obr. 5.29.



Obr. 5.29 Hmotnostní přírůstky slitiny B po 1 000 hodinách oxidace ve vztahu k teplotě [111]

5.1.4 Porovnání metodiky s hodnocením struktury ve 2D

Fraktální geometrie je některými autory používána také pro popis snímků struktury povrchů. Jedná se o vcelku hojně rozšířené použití fraktální geometrie. Především je používána mřížková metoda, například pro popis povrchu oxidované struktury je použita v textech [114–120]. Autor práce používá tuto metodiku také [1, 2]. Jak se ovšem ukazuje, její využití je mnohem více náchylné na okrajové podmínky, než výše uvedená metodika popisu křivek rozhraní.

U mřížkové metody lze identifikovat několik problémů, které jsou zejména spojeny s opakovatelným pořizováním a zpracováním snímků, ve výsledku pak s porovnatelností výsledků z různých měření. (Jak je uvedeno v kap. 5.3, omezení lze rozšířit na analýzu obrazu jakoukoliv metodou.) Popis mřížkové metody je uveden v kap. 4.3.2 a dále v [2, 58, 61, 62, 65]. Tato metoda (nejčastěji) pracuje s binárními obrazy, nicméně obrazy zkorodovaných konstrukcí se většinou zobrazují v šedé nebo barevné škále. Aby byla zajištěna porovnatelnost výsledků z různých měření v čase a na různých zařízeních, musí být transformace na binární obraz (kap. 4.2.2) provedena stejným způsobem (pomocí stejné úrovně šedi pro prahování). Transformace také vyžaduje stejný formát obrazu (stejná bitová hloubka obrazu, barevná maska, komprese...). Tyto požadavky lze splnit, což ovšem stále nezaručuje opakovatelnost. Komplikace se vyskytují při určování podmínek osvětlení a použitého hardware pro pořizování snímků. Klíčovým problémem je osvětlení povrchu vzorku (fotony nebo elektrony):

- poloha osvětlení (zejména úhel mezi osvětlením a vzorkem),
- intenzita osvětlení (ovlivňuje jas získaný ze snímkování povrchu),
- vlnová délka světla (barva u elektromagnetického záření) a
- charakter osvětlení (difúzní nebo směrové).

Snímače ve formě kamery a objektivu pro VIS mají navíc mnoho parametrů umožňujících nastavení, jako jsou:

- rychlost závěrky (doba expozice),
- nastavení clony,
- zisk (gain, citlivost ISO),
- ohnisková vzdálenost,
- světlost objektivu,
- atd.

Nastavení je také možné u elektronového mikroskopu, kde je důležitá stejná doba expozice, jas a kontrastu.

Dále jednotlivé kamery a objektivy se stejnými parametry od různých výrobců často nezískají stejný nebo dostatečně podobný obraz. Problémy dále mohou nastat při porovnávání povrchů s různou mírou odrazu. **Celkově shrnuto, zajištění stejných podmínek pro získání obrazu k následné analýze pomocí mřížkové dimenze nezávisle na zařízení není možné.** Mřížková metoda je použitelná pro srovnání struktury povrchu získaného za stejných softwarových a hardwarových podmínek, tedy na stejném zařízení. V průběhu času je ale i na stejném zařízení obtížné nastavit stejné podmínky. Metodu je tak vhodné použít pro kvantitativní porovnání dané sady vzorků snímaných v jedné sérii experimentu.

Vzhledem k výše uvedenému byl prováděn výzkum použití dalších možností a metod pro odhad fraktální dimenze. Obvodová dimenze (kap. 4.3.1), použitá pro popis křivek rozhraní mezi slitinou a okolím, se jeví jako stabilnější a vhodnější [P2, P4, 99, 104, 108, 121]. Informace o drsnosti nebo charakteru napadení povrchu korozí je redukována na 1D zobrazení, což vede k vyšší stabilitě hodnocení. Na druhou stranu, vzorky určené k testování musí být nejprve připraveny, to představuje větší časovou náročnost a jedná se také o destruktivní přípravu. Nicméně, používány jsou metalografické výbrusy, které jsou standardně připravovány pro další analýzy. Podmínky pro získání křivky rozhraní nejsou tak přísné jako pro mřížkovou metodu. Je důležité zajistit:

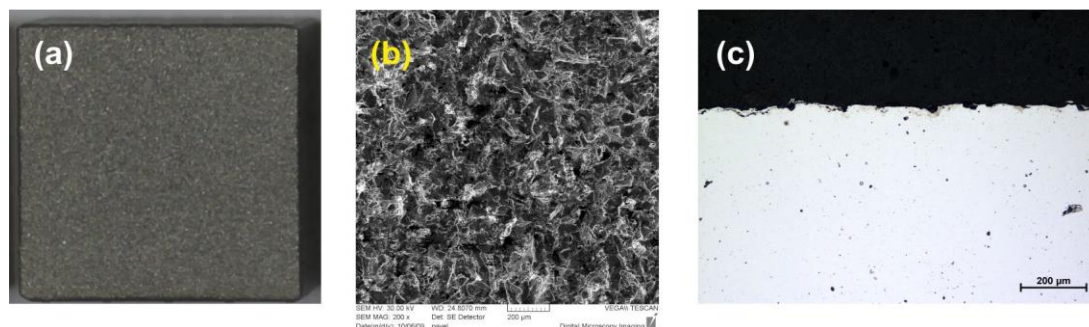
- dostatečný viditelný a stabilní kontrast mezi vzorkem a okolím,
- dobře zaostřený obraz,
- stejný formát obrazu (stejná bitová hloubka obrazu, barevná maska, komprese...).

Redukce zpracovávaných dat na 1D zobrazení a následná analýza pomocí obvodové metody umožňuje, za dodržení podmínek pro snímání, porovnání dat z různých zařízení. Při porovnání dat z více zařízení nebo v různých časových intervalech je třeba být obezřetný a provést experimenty vedoucí k porovnání kvality snímků z různých experimentálních sad.

5.1.4.1 Vliv změny jasů na výsledky získané při použití mřížkové a obvodové dimenze

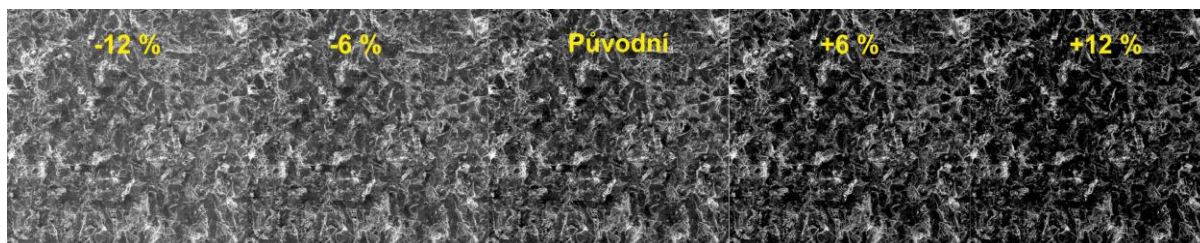
Následující experiment je zaměřen na stabilitu výsledků při změně jasů pořízených snímků. Je porovnáván povrch a rozhraní stejné obrobeneho vzorku. Vzorek byl připraven z nerezové oceli o rozměrech 15 x 15 x 8 mm, povrchová úprava provedena pískováním

korundem zrnitosti č. 36 (střední průměr zrn 0,525 mm). Snímek vzorku je na Obr. 5.30 včetně snímku povrchu z elektronového mikroskopu a části metalografického výbrusu.



Obr. 5.30 Snímek porovnávaného vzorku: (a) snímek vzorku, (b) snímek povrchu z elektronového mikroskopu, (c) snímek z metalografického výbrusu

Snímek povrchu a metalografického výbrusu byly softwarově zpracovány a byl u nich zvýšen a snížen jas po kroku 2 % v rozmezí do -12 % a +12 %. Zvýšení, respektive snížení jasu bylo prováděno přičtením, respektive odečtením odpovídající hodnoty ke každému pixelu matice snímku a zaokrouhlením těchto hodnot na celá čísla. V tomto případě, kdy byla použita 8bitová datová hloubka snímku, odpovídá změně o 2 % hodnota 5,12 úrovně jasu. Upravené snímky jsou na Obr. 5.31 a Obr. 5.32. U obou analýz je prováděna analýza binárního obrazu, tedy snímky v šedé škále musí být převedeny prahováním na binární obraz. Správná hodnota není nijak stanovena a musí být vhodně zvolena s ohledem na míru stability výpočtu odhadnuté fraktální dimenze. Binární hloubka analyzovaných snímků v šedé škále byla 8, tedy pixely mají stupeň šedi v hodnotách od 0 do 255. Všechny snímky s různým jasnem byly převáděny na binární obrazy s prahem od 20 do 160 (krok změny prahu byl 20).



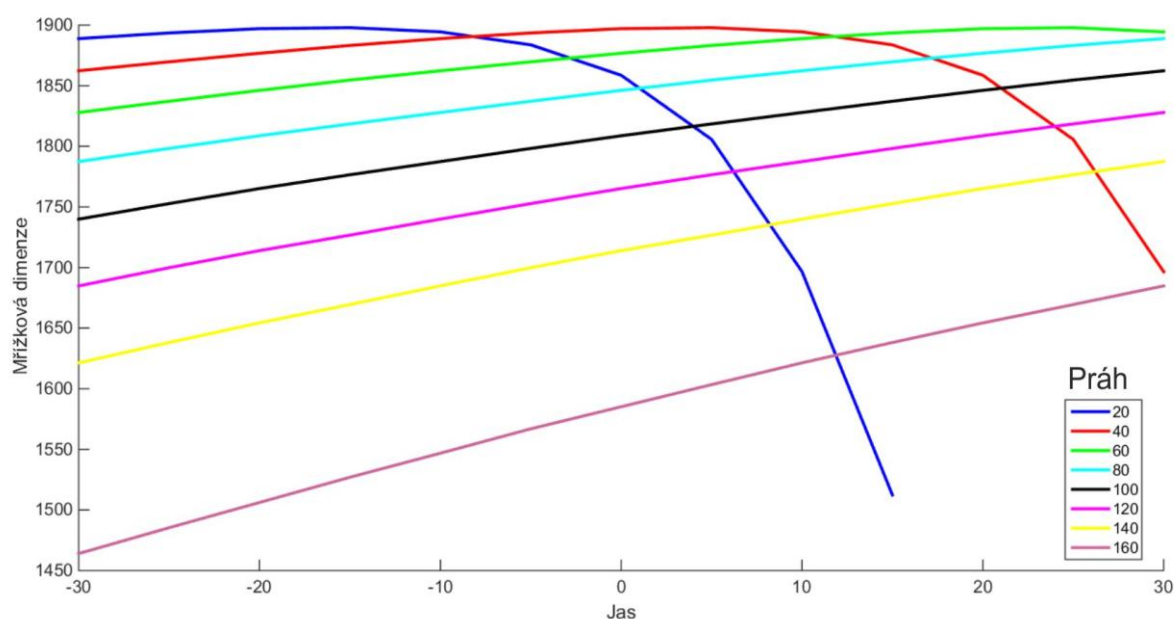
Obr. 5.31 Změna jasu snímků z povrchu elektronového mikroskopu



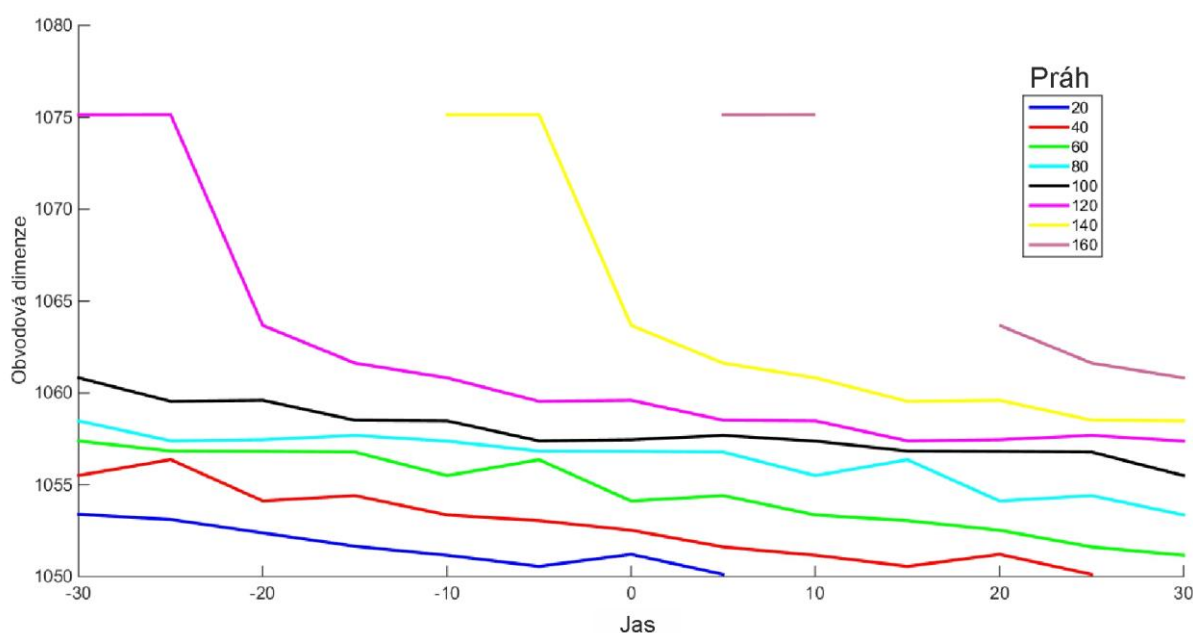
Obr. 5.32 Změna jasu snímků metalografického výbrusu

Výsledky výpočtu odhadnuté fraktální dimenze jsou na Obr. 5.33 a Obr. 5.34. Nulové hodnoty odhadnuté fraktální dimenze jsou v obou případech odstraněny. Jak je na první pohled zřejmé, rozsah výsledků mřížkové dimenze ($D_{B\ 1000} = \langle 1\ 464,1\ 897 \rangle$) je při dané

analýze podstatně větší než u obvodové dimenze ($D_{C\ 1000} = \langle 1\ 050, 1\ 075 \rangle$). Mřížková dimenze se může pohybovat v rozsahu $D_{B\ 1000} = \langle 0,2\ 000 \rangle$ a obvodová dimenze v rozsahu $D_{C\ 1000} = \langle 1\ 000, 2\ 000 \rangle$. Pak ve vztahu k rozsahu odhadnutých dimenzí je rozdíl mezi získanými hodnotami u mřížkové dimenze na úrovni 21,7 % a u obvodové dimenze na úrovni 2,5 %. Samozřejmě u obvodové dimenze lze identifikovat malé rozdíly pro určité prahy (např. u prahu 60 je rozdíl na úrovni 3,5 %), ale optimální práh není předem znám a nemusí vést k potřebnému rozdílu ve výsledcích při porovnání mezi jednotlivými analyzovanými vzorky.



Obr. 5.33 Výsledky odhadu fraktální dimenze povrchu pomocí mřížkové metody se změnou jasu snímku, zobrazeny jsou výsledky pro více prahů



Obr. 5.34 Výsledky odhadu fraktální dimenze křivky rozhraní pomocí obvodové metody se změnou jasu snímku, zobrazeny jsou výsledky pro více prahů

Je zřejmé, že tento experiment by bylo vhodné dále rozvinout o porovnání více povrchových struktur a porovnání jejich rozlišitelnosti. Tímto směrem bude, mimo jiné, pokračovat výzkum v této oblasti a výsledky budou publikovány v odborné literatuře.

5.1.5 Závěr kapitoly

Jak dokládají výsledky této kapitoly, pro hodnocení korozního napadení kovů a slitin lze použít metody obrazové analýzy, která slouží k interpretaci získaných dat ve formě snímků metalografických výbrusů. Metoda již byla testována na velkém objemu dat (tisíce snímků) a byla prezentována v odborných impaktovaných publikacích. Představená metodika umožňuje automaticky kvantifikovat vlastnosti křivek rozhraní kovů a slitin, a to ve velkém počtu snímků. Metodiku lze obecně použít na analýzu korozního napadení povrchů kovů a jejich slitin.

Představeny byly dvě možnosti použití v praktickém výzkumu a představují vhodný doplněk k používaným metodám zjišťování míry korozního napadení.

Tato kapitola prezentuje přínosy pro vědu v oblasti užití fraktální geometrie spolu se statistikou a předkládá možnosti výběru parametrů, které je vhodné použít pro pokud možno úplný popis získaných dat ve formě křivek rozhraní. Mezi přínosy pro vědu lze počítat také zdůvodnění vyšší stability uvedené metodiky analýzy křivek rozhraní oproti 2D analýze povrchu.

5.2 Corrugation test – kvantifikace jakosti plochého skla

V předchozí kapitole zmíněná metodika je snadno přenositelná na další typy rozhraní v dalších oblastech vědy, výzkumu a vývoje. Pro metodiku není důležitá fyzikální podstata rozhraní ani podstata jeho vzniku. Důležitý je topologicky jednodimenzionální charakter křivky. Toho je využíváno také pro popis optického rozhraní světla a stínu.

Ploché sklo, tedy objekt kontroly, je vyráběno technologií FLOAT. Ta je založena na plavení skloviny na roztavené cínové lázni. Sklo tak dosahuje vysoké jakosti a lze ho přímo použít pro výrobu zrcadel nebo automobilových skel. Více o této technologii lze nalézt v odborné literatuře, např. [13, 122].

Kvalita plochého skla vyráběného technologií FLOAT je sledována souborem metod posuzujících vady plochého skla od kamének (kap. 6.2.2), bublinek (kap. 6.2.1), šlír (kap. 6.2.4), přes konstantní tloušťku až po optické zvlnění. Úkolem kontroly jakosti skla je charakterizovat tyto vady a podle smluvně daných kritérií zařadit sklo do tříd jakosti. Naměřené hodnoty testů jsou porovnávány a vyhodnoceny dle platné vnitřní normy jakosti. Hlavní váha kontroly je zaměřena na vady, které se kontrolují on-line pomocí laserového senzoru na výrobní lince a výsledky kontrol jsou k dispozici přímo na řídicím pracovišti. Převážně pomocí této metody jsou skla řazena do tříd jakosti.

Princip optického testu pomocí zebra-desky je jedním z důležitých měření a používá se v široké škále situací:

- jako výrobní kontrola producentů surového plaveného skla;
- jako kontrola jakosti odběratelů tohoto skla, a jako výrobní kontrola následných výrobků (vrstvené sklo, tepelně ošetřené sklo atd.);
- jako kontrola kvality konečným zákazníkem na zakoupeném skle.

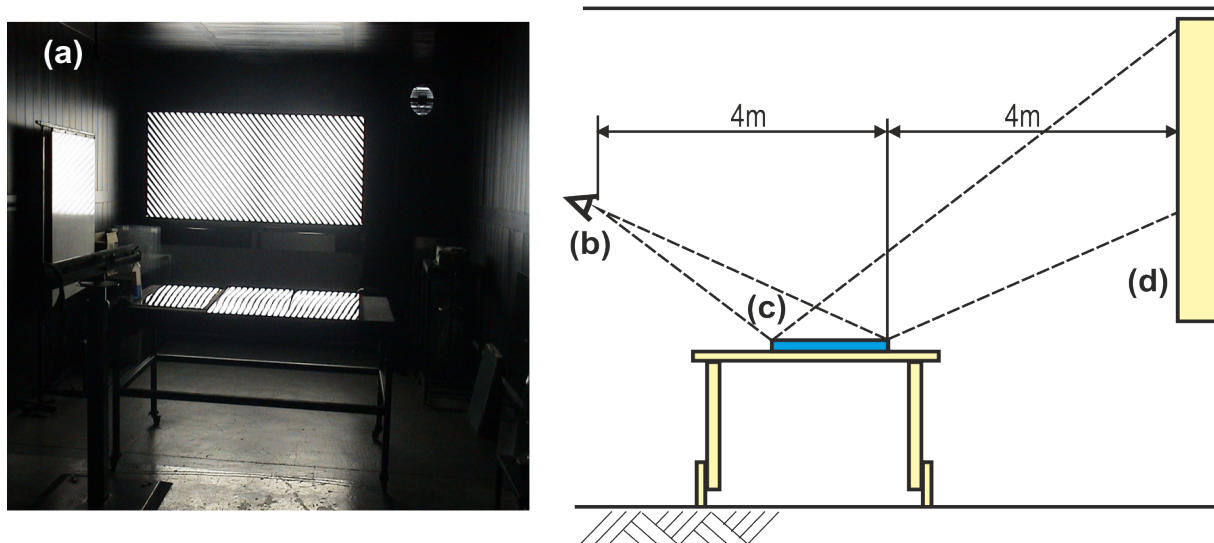
Corrugation test (test zvlnění) je jedním z těchto testů a významným měřítkem jakosti skla. Test hodnotí optickou jakost (zvlnění nebo deformaci) skla srovnáním s etalony a je prováděn subjektivně obsluhou off-line. Pro objektivizaci tohoto testu byla použita metoda odhadu fraktální dimenze pomocí obvodové metody v kombinaci se statistikou. Metodika byla následně převedena do on-line hodnocení jakosti přímo na lince (in-line).

Protože metoda pro off-line měření již byla několikrát publikována, následující text se zaměřuje na metodiku, ale technické provedení zde již není více rozepisované. Akcent je směřován na on-line hodnocení umístěné in-line, kde výsledky nebyly zatím publikovány.

Výzkum byl podpořen několika granty [G5–G7] a také řešení bylo uplatněno jako ověřená technologie/metodika [123–126]. Výsledky byly prezentovány v odborných textech [1, 2, P1, P2, 127–131].

5.2.1 Metodika kontroly jakosti pomocí corrugation testu

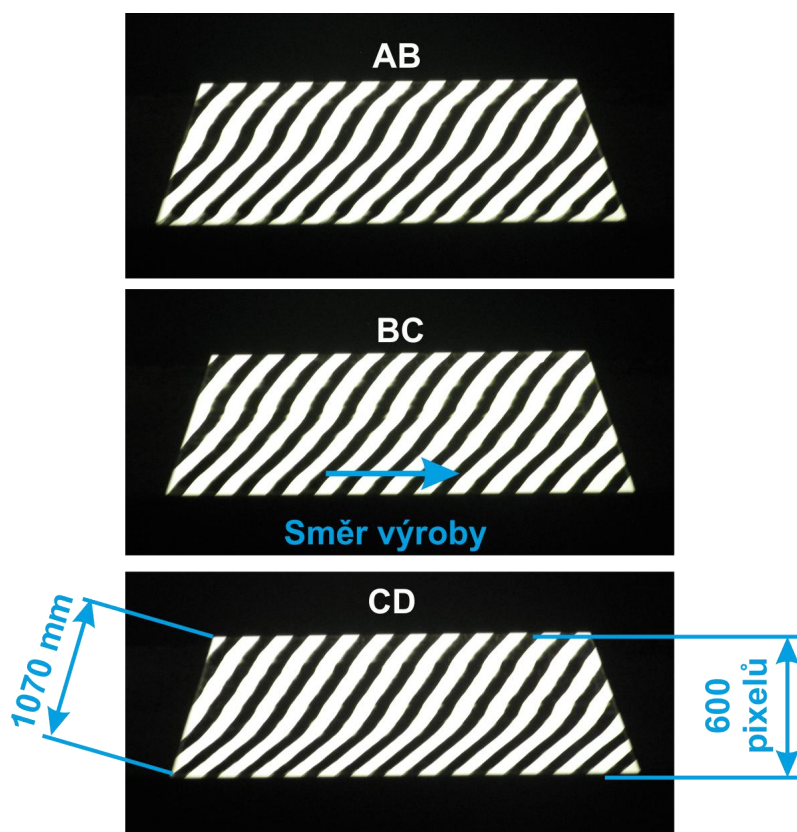
Corrugation test se provádí v uzavřené místnosti, izolované (především světelně) od okolního provozu a je založen na odrazu světla na vzorcích ze 4 000 mm vzdálené šikmo pruhované desky (zebra-desky), což je matovaná skleněná tabule o rozměru 2 000 x 1 000 mm s černými pruhy o šíři 25 mm pod úhlem 45 stupňů. Pozorovatel je od stolu se vzorky vzdálen další 4 000 mm a subjektivně porovnává jakost vzorků s etalony (Obr. 5.35).



Obr. 5.35 Pracoviště pro hodnocení jakosti plochého skla: (a) snímek pracoviště, (b) pozorovatel, (c) stůl s analyzovanými vzorky skla, (d) stacionární zebra-deska, [1]

Vzhledem k tomu, že úhel dopadu θ_i se u tohoto uspořádání pohybuje v rozsahu od $82,5^\circ$ do 84° , koeficient odrazivosti pro nepolarizované světlo R se pohybuje v rozmezí od 46,4 % do 55,8 % (kap. 3.1.7.2). Což znamená, že přibližně polovina viditelného dopadajícího světla na povrch skla je odražena.

Tímto testem se hodnotí celý pás šíře 3 210 mm a oříznuté délky 500 mm, který je rozdělen pro skla tloušťky do 6 mm na 3 části (označované AB, BC, CD, Obr. 5.36) a pro skla tloušťky nad 6 mm na 4 části (označované AB, BC, CD, DE). Kontrola se provádí na cínové straně skla (na povrchu, který byl v kontaktu s cínovou lázní), protože kvalita cínové strany je vlivem pohybu skla po cínu horší. Obr. 5.37 ukazuje jakosti vyhovující a nevyhovující skleněné tabule během testu zvlnění. Použití malého pozorovacího úhlu způsobilo významné "zkreslení" odrazu zebra-desky při malých změnách tvaru na povrchu skla. Vzorky se řadí do stupňů jakosti většinou od 2 do 3,5. Podle pracovních etalonů se ohodnotí celá šíře pásu a přiřadí se odpovídající hodnoty jakosti všem třem, respektive čtyřem částem celé šíře pásu. Četnost provádění corrugation testu je 1× za 2 hodiny, na vyžádání i častěji.

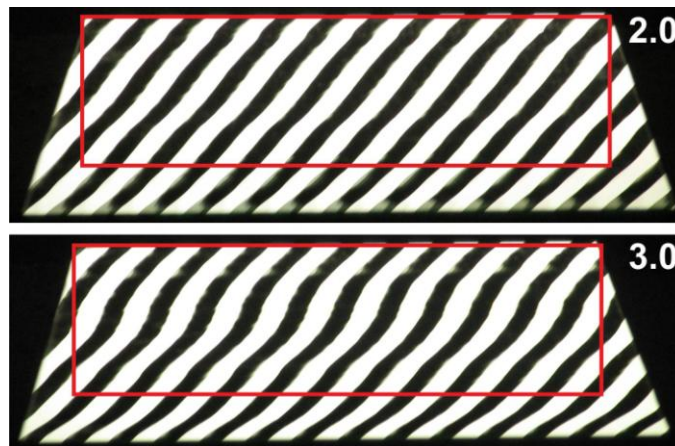


Obr. 5.36 Příčný pás skla rozdělený na 3 samostatně hodnocené části (AB, BC, CD)

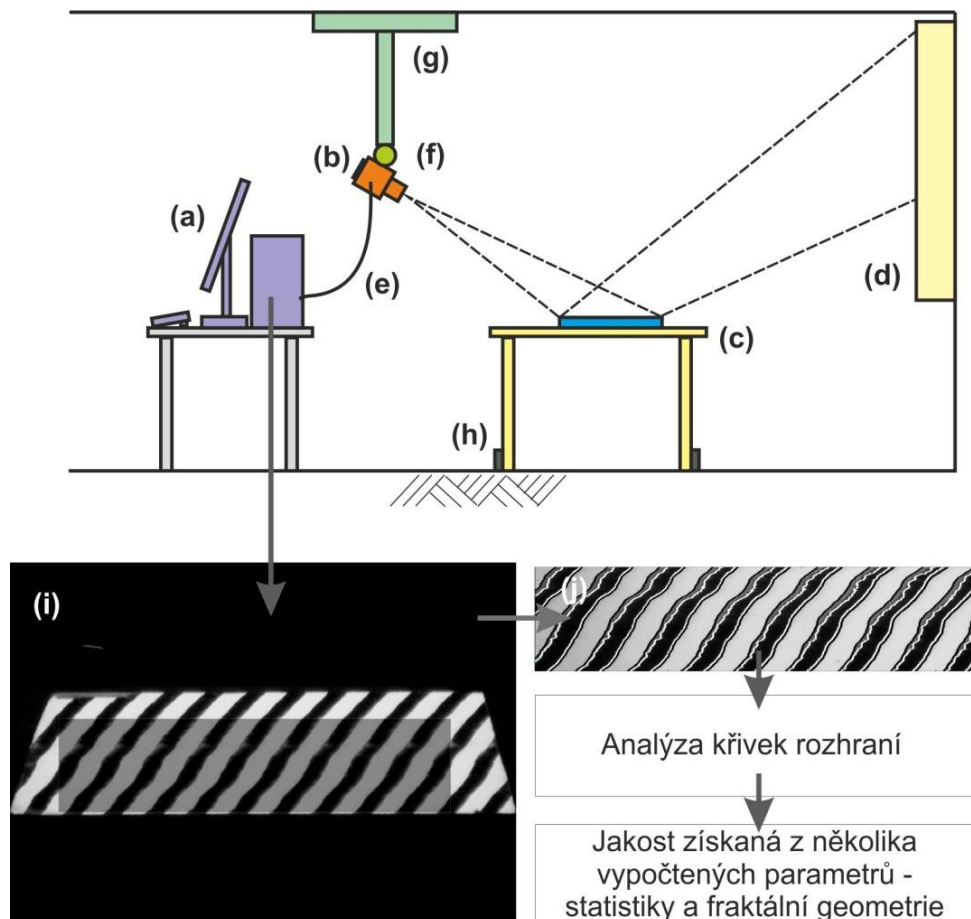
5.2.2 Princip metodiky objektivizace off-line hodnocení

Pro objektivizaci byla odzkoušena a navržena metodika hodnocení pomocí obrazové analýzy, která využívá digitálních snímků, které jsou dále softwarově zpracovány nikoliv jako celé snímky, ale jsou z nich generovány křivky rozhraní a ty jsou hodnoceny. Jedná se opět o převod z topologicky dvourozměrného problému na jednorozměrný.

Ve výzkumu byl na základě výsledků experimentů navržen systém objektivního měření (Obr. 5.38) a software pro analýzu Vlnitost.



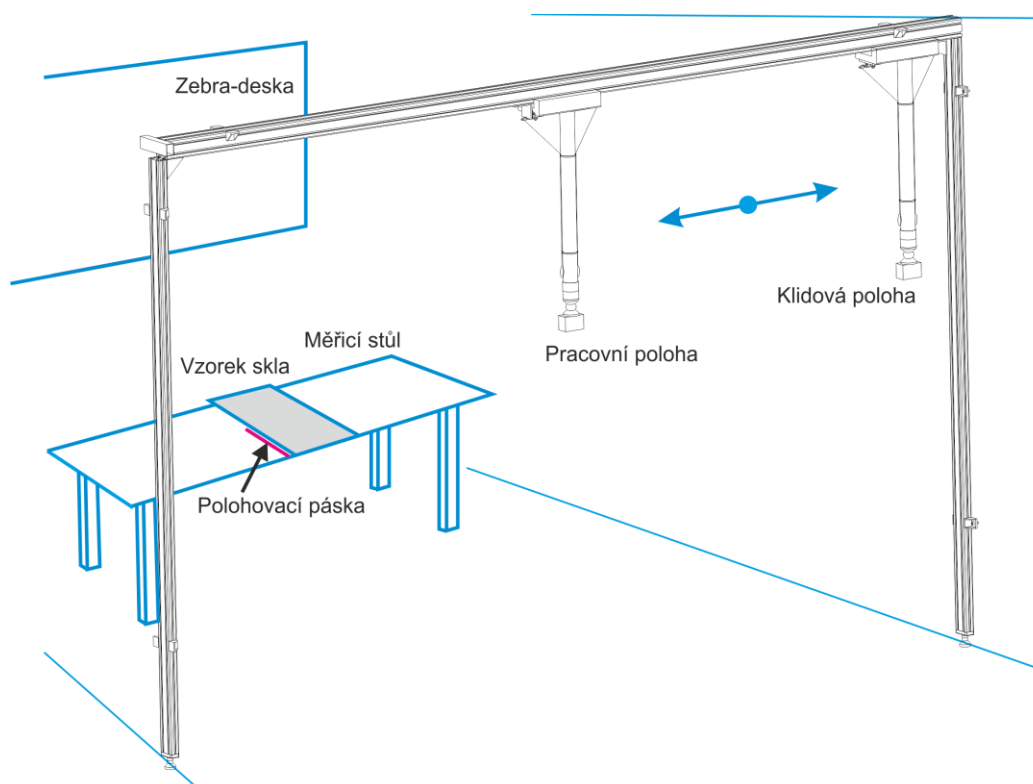
Obr. 5.37 Vyhovující a nevyhovující jakost tabule plochého skla včetně vyznačené oblasti analýzy snímku [P1]



Obr. 5.38 Schéma zařízení pro objektivizaci corrugation testu off-line: (a) počítač pro zpracování dat ze snímače, (b) snímač (kamera/fotoaparát), který nahrazuje pozorovatele, (c) stůl s analyzovanými vzorky skla, (d) stacionární zebra-deska, (e) propojení počítače se snímačem, (f) kulová hlava pro nastavení polohy snímače, (g) pojízdný stativ, (h) fixace stolu pomocí trnů, (i) získaný snímek odrazu zebra-desky od vzorku skla, (j) získání křivek rozhraní a jejich analýza [P1, 1]

Celý postup zpracování lze rozdělit do jednotlivých kroků (podle obecného popisu v úvodu kap. 4):

- 1) Nařezání a následně položení hodnoceného vzorku na stůl (Obr. 5.38 c) a zadání potřebných parametrů vzorku obsluhou do počítače (přes grafické rozhraní).
 - 2) Snímkování odrazu zebra-desky (Obr. 5.38 d) od vzorku snímačem (digitálním fotoaparátem) v černobílém módu (Obr. 5.38 b) a převod do počítače (Obr. 5.38 a). Použitý snímač byl fotoaparát Canon PowerShot Pro1 s rozlišením 3 288 x 2 472 pixelů (8,1 Mpx), získaný snímek vzorku je na Obr. 5.37.
 - 3) Reprezentace obrazových dat:
 - a) Nalezení vzorku na snímku a jeho případné otočení. Digitální výřez vybrané části snímku (Obr. 5.38 i).
 - b) Prahování, získání a výběr úplných křivek rozhraní a jejich analýza (Obr. 5.38 j).
 - c) Výpočet statistických parametrů a odhad fraktální dimenze křivek rozhraní.
 - d) Přepočet vybraných parametrů na škálu jakosti používanou v současné době.
 - 4) Zobrazení a uložení informace o jakosti na obrazovce počítače.
- Zobrazení zařízení ve 3D s naznačením konstrukčního řešení je na Obr. 5.39.



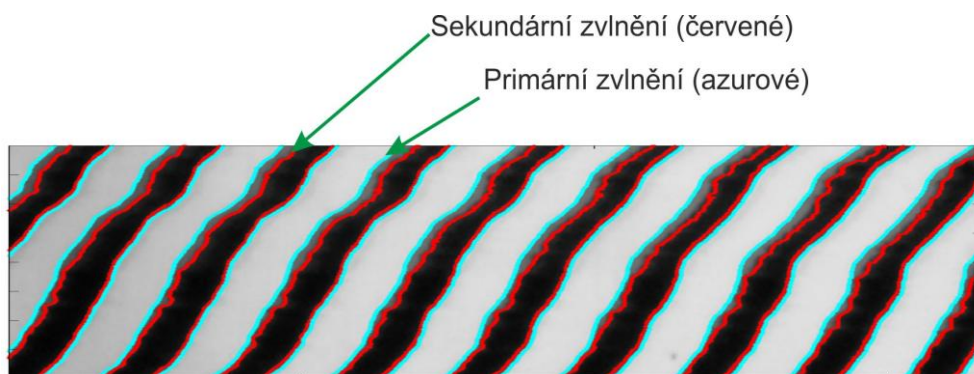
Obr. 5.39 Schéma zařízení v 3D zobrazení (konstrukční řešení)

V kroku 1 je položen vzorek na stůl a díky pokročilé analýze polohy vzorku není třeba vzorek přesně polohovat. Na stole je vyznačená přibližná poloha umístění a vzorek od ní může být vzdálen ± 20 mm a pootočen $\pm 10^\circ$. Musí být jen uložen v zorném poli snímače. Stůl je pro účely testu fixován v jednom místě pomocí trnů, které zaskočí do otvorů v podlaze (Obr. 5.38 h).

Snímkování vzorku v kroku 2 je nutné provádět z pevně daného místa a pevně lokalizovaným umístěním snímače daným pěti parametry: polohou ve třech osách, horizontálním a vertikálním natočením. To je zajištěno pomocí speciálního stativu (Obr. 5.38 g), který je umístěn v místě analýzy a lze ho snadno přesunout z aktivní polohy pro měření do polohy klidové, kde nebrání obsluze v dalších testech. Poloha snímače je zajištěna pomocí pevně fixované kulové hlavy (Obr. 5.38 f).

V kroku 3 je snímek odrazu zebra-desky automaticky nalezen, případně otočen a je v něm vybrána potřebná část pro následnou analýzu. Digitální vyříznutí části snímku se provádí pro získání té části obrazu, která je důležitá pro analýzu (Obr. 5.38 i).

Vlivem technologie výroby lze na většině vzorků skla pozorovat dvě zvlnění. Primární, jako jasné zvlnění odražených pruhů, a sekundární, které se jeví jako nejasná „rozpitá“ hranice primárního zvlnění, Obr. 5.40. Různý poměr primárního a sekundárního zvlnění mají i jednotlivé etalony odpovídající daným třídám. Každé ze dvou zvlnění – křivek rozhraní je z obrazu získáno pomocí dvou různých prahů, pomocí obrazové analýzy (Obr. 5.38 j, kap. 4.2.2).



Obr. 5.40 Primární a sekundární zvlnění na vzorku plochého skla [1]

Pro každou křivku je provedena analýza a výsledky pro všechny kompletní křivky jsou prezentovány pro jeden vzorek jako průměrná hodnota, rozpětí výsledků a směrodatná odchylka.

Pro analýzu křivek rozhraní vzorků byly využity tři základní typy parametrů, stejně jako v kap. 5.1.1:

- *parametry amplitudy*, které jsou používány pro charakterizaci míry odchylky od požadovaného stavu (např. Std – směrodatná odchylka, Pa – střední aritmetická úchylka profilu, Pt – maximální výška profilu povrchu – rozsah vlnitosti od ideální křivky),
- *parametry frekvence*, které jsou používány pro charakterizaci vlnové frekvence získaných křivek (např. Sm – střední rozteč nerovností profilu),
- *parametry složitosti a deformace*, které popisují složitost křivky (např. odhad obvodové dimenze D_C , relativní délka profilu L_R).

Na rozdíl od analýzy metalografických snímků nebyl u tohoto typu dat použit parametr frekvence. Na základě analýzy stovek vzorků byly vybrány parametry: obvodová dimenze

(parametr složitosti), rozsah vlnitosti od ideální křivky (parametr amplitudy), relativní délka (kap. 5.1.1), víc podrobností v [1, 2, P1].

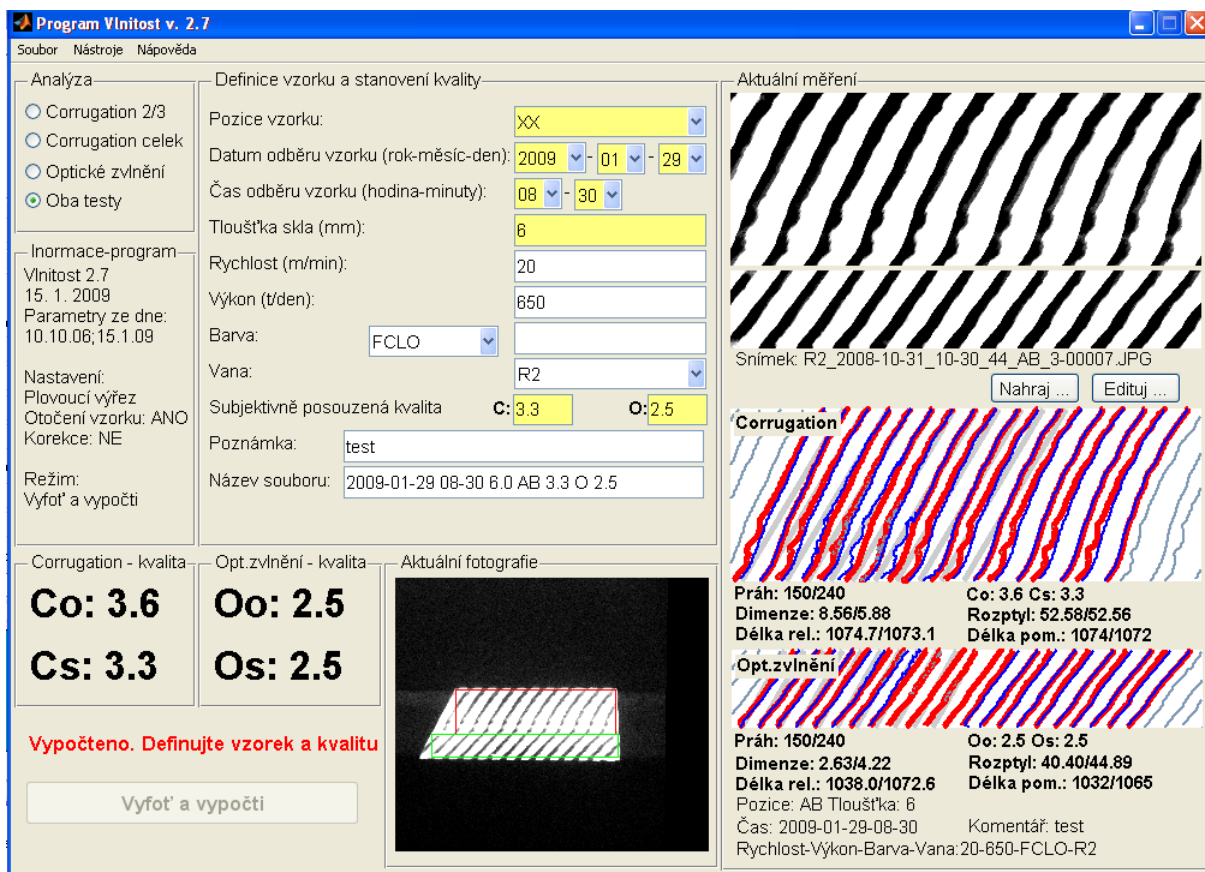
Parametrů, které byly použity pro analýzu jakosti, je celkem 6 a všechny jsou měřeny v pixelech. Pro přepočet na současnou škálu jakosti je použito váhových koeficientů. Pro jejich stanovení byly nejprve jediným zkušeným operátorem zařazeny stovky vzorků do tříd jakosti. Tedy bylo použito subjektivní posouzení míry pravidelnosti, složitosti a váhy mezi oběma zvlněními. Následně pomocí vyvinutého software pro nalezení nejmenších možných rozdílů mezi vyhodnocenou jakostí pomocí analýzy obrazu a použitím subjektivního sledování zkušeného operátora, byly stanoveny optimální koeficienty pro přepočet objektivní jakosti z 6 uvedených parametrů. To umožnilo zachovat původní vnitřní normu rozdělovací zvlnění do tříd jakosti v rozsahu od 1,5 do 3,5.

Pro tento test byl vyvinut software, který má své grafické rozhraní pro snadnou komunikaci s obsluhou zařízení. Obrazová analýza byla vyvinuta v prostředí Matlab a kompilovaná pomocí programu Matlab-Compiler do samo-spustitelného programu nazývaného *Vlnitost*. To znamená, že program není závislý na prostředí Matlab, ale pouze na jeho tzv. knihovnách, které jsou spolu s programem nainstalovány na počítači v laboratoři. K běhu celého systému je potřeba, aby byl spuštěn program PSRemote 1.4, který umožňuje přímou komunikaci mezi snímačem a počítačem (tento program se automaticky spouští s programem *Vlnitost*). Většina úkonů v počítači je automatizována a celá analýza včetně automatického vyfocení (díky zajištění komunikace mezi počítačem a snímačem) je odstartována jediným tlačítkem. Operátor zadá standardní parametry vzorku a po analýze se mu v okně objeví výsledná jakost. Výsledky a zadané parametry vzorku jsou ukládány tak, aby bylo možno sledovat změny v čase a je možné je exportovat do standardního formátu pro MS Excel. Náhled grafického rozhraní vyvinutého software je na Obr. 5.41. Výsledkem je objektivní jakost corrugation testu Co. Software také uvádí subjektivně stanovenou jakost Cs.

Software stejnou metodikou vyhodnocuje i optické zvlnění, které se hodnotí na okrajích skla (po odstranění tzv. bortů, kap. 6.6.1). Optické rozhraní využívá stejné matematické nástroje a stejných 6 parametrů pro hodnocení jakosti. Stanovení objektivní jakosti bylo ale provedeno na samostatném souboru dat získaných od stejného zkušeného operátora. V grafickém rozhraní software je objektivní výsledek označen Oo a subjektivně zadaná jakost Os (Obr. 5.41).

Nespornou výhodou celého systému je možnost uchovávat v počítači nejen výsledky hodnocení, ale i snímky prakticky po libovolně dlouhou dobu, pouze s nárokem na odpovídající místo na pevném disku kontrolního počítače. Je tak vytvářena rozsáhlá databáze umožňující zpětnou kontrolu.

Výsledky dlouhodobého nasazení off-line hodnocení v praxi jsou uvedeny na Obr. 5.42, kde jsou zahrnuta data z hodnocení různými operátory na lince. Shoda v tomto případě není úplná, protože cílem byla objektivizace testu, která neodpovídá vždy subjektivnímu hodnocení. Subjektivní hodnocení může být ovlivněno tlakem na plnění plánu v dané jakosti.



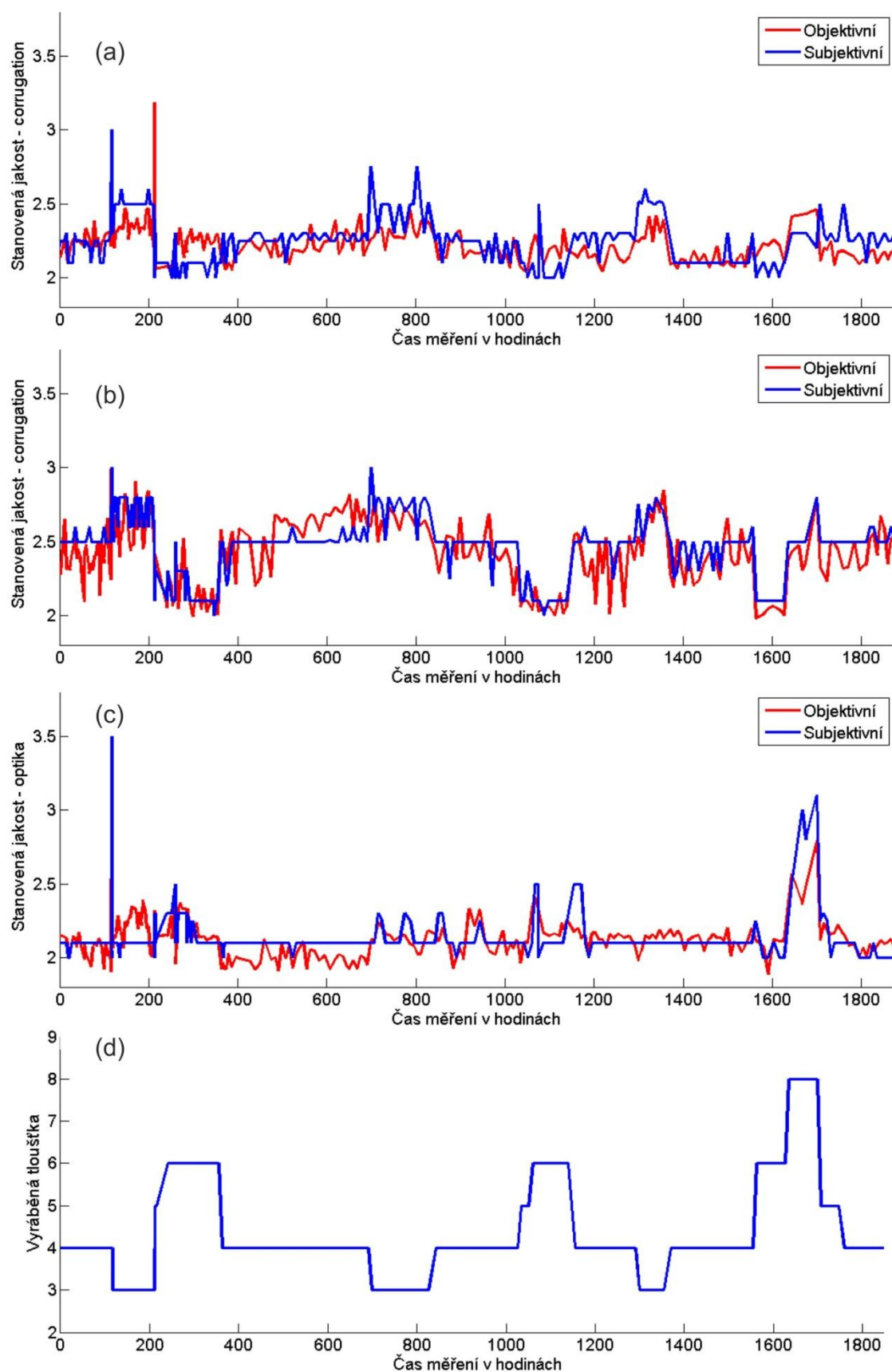
Obr. 5.41 Náhled grafického rozhraní pro off-line hodnocení jakosti plochého skla corrugation testem

5.2.3 Vývoj on-line hodnocení in-line

Na úvod je třeba stanovit souřadnicový systém, který bude shodný s již zavedeným souřadnicovým systémem v kap. 2. V prostoru je uvažován levotočivý kartézský souřadnicový systém, kde osa x je ve směru pohybu pásu, osa y je výškou (reprezentuje mimo jiné tloušťku skla) a osa z je napříč vyráběného pásu. Osy u a v jsou osami v získaném obrazu.

Výzkum v této oblasti byl zaměřen na realizaci on-line corrugation testu umístěného přímo na lince (in-line) a měl tyto základní body:

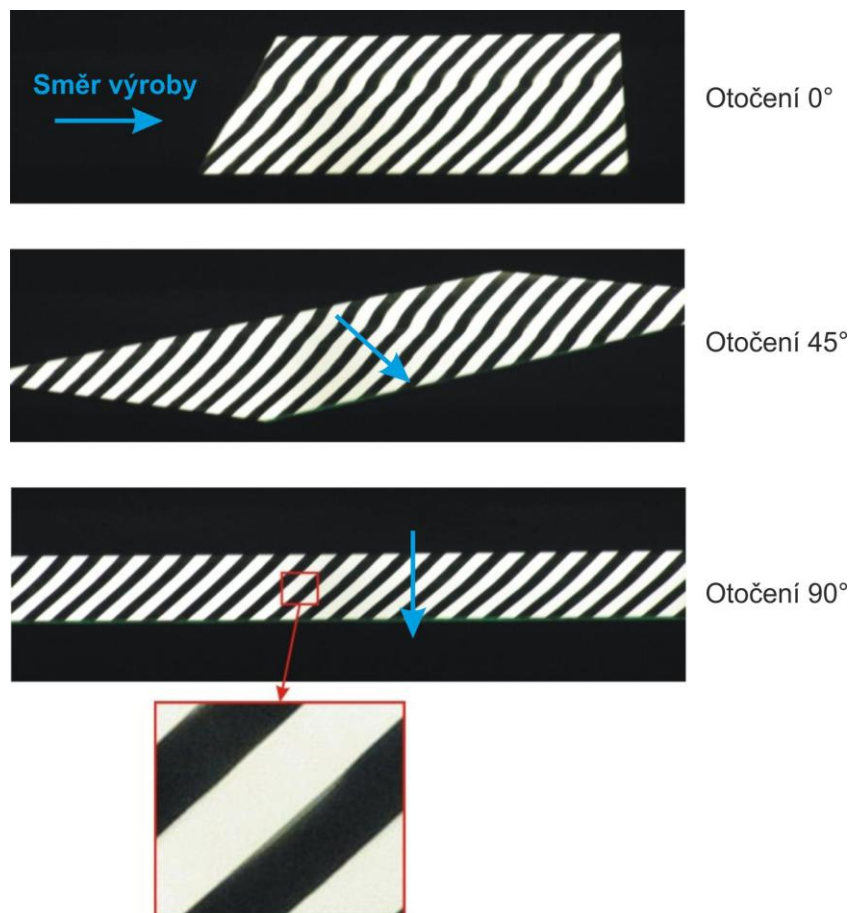
- specifikace požadavků na on-line testování jakosti skla, vymezení základních okrajových podmínek,
- volba základní koncepce zařízení,
- návrh experimentálního zařízení instalovaného na linku,
- vývoj software pro on-line hodnocení corrugation testu na platformě programu Vlnitost pro off-line objektivní hodnocení,
- experimentální ověření on-line zařízení pro hodnocení corrugation testu na lince FLOAT až po poloprovozní nasazení,
- návrh provozního zařízení pro on-line měření corrugation testu in-line.



Obr. 5.42 Porovnání objektivního a subjektivního hodnocení jakosti v čase na off-line zařízení corrugation testu, (a) corrugation test pozice AB, (b) corrugation test pozice BC, (c) optické zvlnění pozice AB, (d) změna tloušťky vyráběného skla v čase

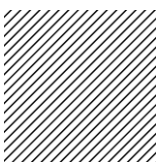
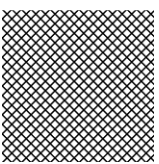
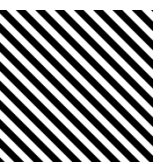
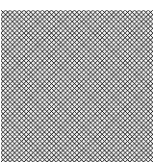
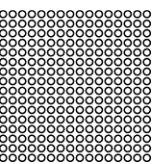
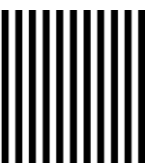




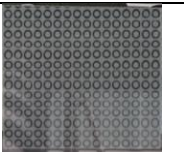
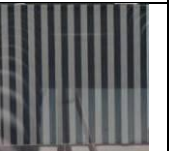






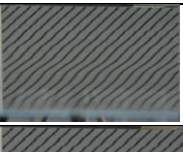
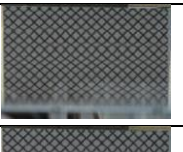
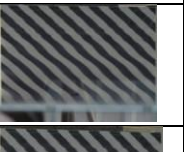

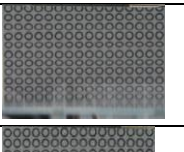
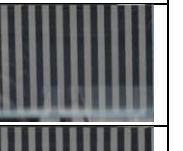
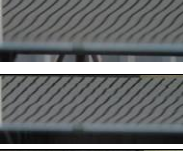
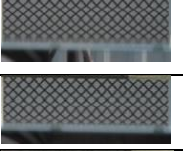
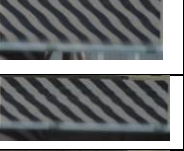
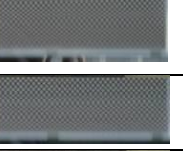
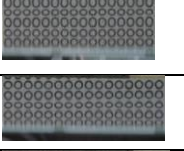
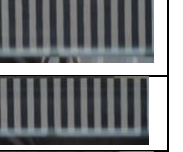
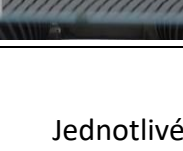
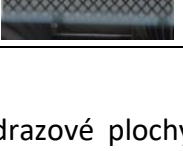
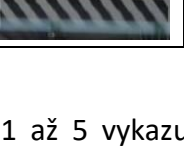
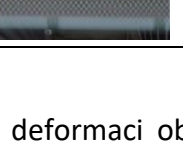
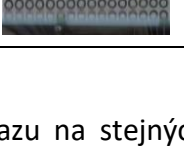

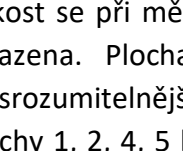
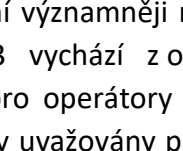
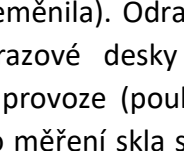
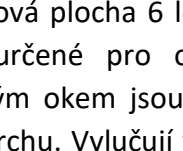
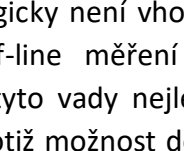
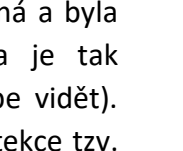
Prvotním požadavkem z průmyslové praxe bylo zařízení, které bude mít především informativní charakter. Výsledky z hodnocení jakosti mohou být dostupné v řádech minut. Z toho vyplynula základní koncepce umístění zařízení nad linku tak, aby byla hodnocena horní strana výrobku. Koncept vycházel z panelů sloužících k informativnímu hodnocení jakosti operátorem, které jsou složeny ze zářivkových trubíc pod úhlem 45° umístěných nad pásem skla. Toto zařízení bylo zvažováno jako mobilní nebo jako stacionární. Zásadním problémem je ovlivnění snímání okolními zdroji záření (osvětlení haly) a změny v osvětlení během dne a noci. Zařízení by tak muselo být zakrytováno a pevně umístěné. Celkově by to znamenalo velký zastavěný prostor nad linkou. Byla proto uvažována i koncepce umístění zařízení pod linku, což by znamenalo detekci spodní strany skla, která má převážně horší jakost, zároveň by zastavěný prostor byl pod linkou a zajištění světelných podmínek by bylo snadnější. Tato koncepce však má celou řadu okrajových podmínek. Ty jsou dány především omezeným prostorem pod linkou a nebezpečím poškození zařízení od padajících střeplů, které se mohou v případě problému s výrobou vyskytnout.

Koncepce také vyžaduje snímání skla napříč, tedy snímač musí být umístěn podél linky a naproti ní musí být umístěna světelná zebra-deska. Pokud by snímač a světelná deska byly umístěny uprostřed skleněného pásu nad nebo pod linkou, vady skla by nebyly zřetelné. Výsledky experimentu jsou zobrazeny na Obr. 5.43. Důvodem je, že zvlnění skla se projevuje výrazněji napříč vyráběného pásu skla než v jeho směru. Příčinu je třeba hledat ve výrobním procesu plavení plochého skla na cínové lázni.



Obr. 5.43 Vliv natočení skla na pořízený snímek

Tab. 5.8 Snímky odrazových motivů od povrchu skla při různých úhlech

	1	2	3	4	5	6
Motiv						
A						
B						
C						
D						
E						
F						

Jednotlivé odrazové plochy 1 až 5 vykazují deformaci obrazu na stejných místech (jakost se při měření významněji neměnila). Odrazová plocha 6 logicky není vhodná a byla vyřazena. Plocha 3 vychází z odrazové desky určené pro off-line měření a je tak nejsrozumitelnější pro operátory v provozu (pouhým okem jsou tyto vady nejlépe vidět). Plochy 1, 2, 4, 5 byly uvažovány pro měření skla svrchu. Vylučují totiž možnost detekce tzv. sekundárního zvlnění. Mřížkování na ploše 2 a 4 se jevílo jako významné z pohledu jasné detekce velikosti, polohy vad a míry deformace (příčný pruh umožňuje lepší stanovení vzdálenosti a přidává druhý rozměr). Odrazem mřížkované plochy lze vytvořit přesnou mapu deformace reálného obrazu použití pro zasklení. S ohledem na detekci sekundárního zvlnění, již vyvinutou metodiku a snadnou přenositelnost částí software do programu pro on-line detekci, se jevil jako nejvhodnější motiv se zebra-deskou (č. 3).

Při experimentu se prokázala možnost snímání odrazové plochy pod relativně malým úhlem. Extrémně nízké úhly nejsou vhodné především z důvodů hloubky ostroty, která není dostatečná pro celou šíři pásu a malého rozlišení, které se snižuje se vzdáleností od snímače. Hustota dat se snižuje s úhlem snímání, což snižuje rozlišovací schopnost navrhovaného systému. Je také zřejmé, že vady byly opticky zřetelnější při menších úhlech, což je ovšem způsobeno „nahuštěním“ obrazu do užšího pásu.

V Tab. 5.7 jsou v posledním řádku uvedeny hodnoty pro off-line řešení. Jak je zřejmé, tak získané úhly jsou zcela odlišné, a to díky jiné pozici snímače pro off-line a on-line měření. Snímač je v případě off-line řešení umístěn podstatně dále od snímaného skla a šířka snímaného skla je také méně než 1/3, respektive 1/4 celkové šířky pásu. Tento poznatek je důležitý, software pro off-line hodnocení nebude přímo přenositelný, protože charakter zvlnění bude pro dané polohy menší. Váhové koeficienty budou muset být znovu spočítány pro správné stanovení jakosti.

5.2.3.2 Vliv světelných podmínek, zdroje světla a stanovení míry zakrytí systému

Světelné podmínky, nutnost zastínění a potřebná intenzita záření se obtížně stanovují na základě exaktních výpočtů. V tomto případě proto bylo nutné provést sérii experimentů, které jsou rutinní z pohledu přípravy zařízení s kamerovým systémem pro VIS a nejsou proto dále rozepisovány. Provedeny byly experimenty se zdroji záření (zářivka a LED), zakrytím (simulace snímáním za dne a v temné místnosti), rozptyl použitých LED pásek a podmínky pro použití rozptylových desek a další.

Z experimentů v laboratoři vyplynula nutnost stabilnějšího a říditelného zdroje pro zebra-desku s vyšším světelným tokem [lm], zvoleny byly LED pásky. Cílem je dosáhnout vyšší intenzity záření odraženého od povrchu skla a tím zvýšení hloubky ostroty při daném poměru doby expozice a clony (kap. 3.1.7.4).

Na snímcích v Tab. 5.8 je také vidět odraz okolního zařízení a také pohled skrz sklo na dopravní válec. Zařízení tak musí být zakrytováno svrchu i zespodu, aby byl minimalizován účinek okolních světelných vlivů a stabilizovány světelné podmínky. Jak se dále ukázalo, není nutné systém hermeticky uzavřít proti okolnímu světlu, ale při dostatečně výkonném zdroji zebra-desky je možné ponechat určité části jen zastíněné.

5.2.3.3 Stanovení rozlišení snímače, podmínek a limit pro hodnocení technologické scény pod úhlem

Vzhledem ke změně rychlosti pásu s vyráběným sortimentem (Tab. 5.9) je nutné použít triggerovacího zařízení, které bude snímat rychlost pásu a podle toho měnit rychlost snímání. Cílem je dosáhnout frekvence snímání vztahené k pozici pásu (délce).

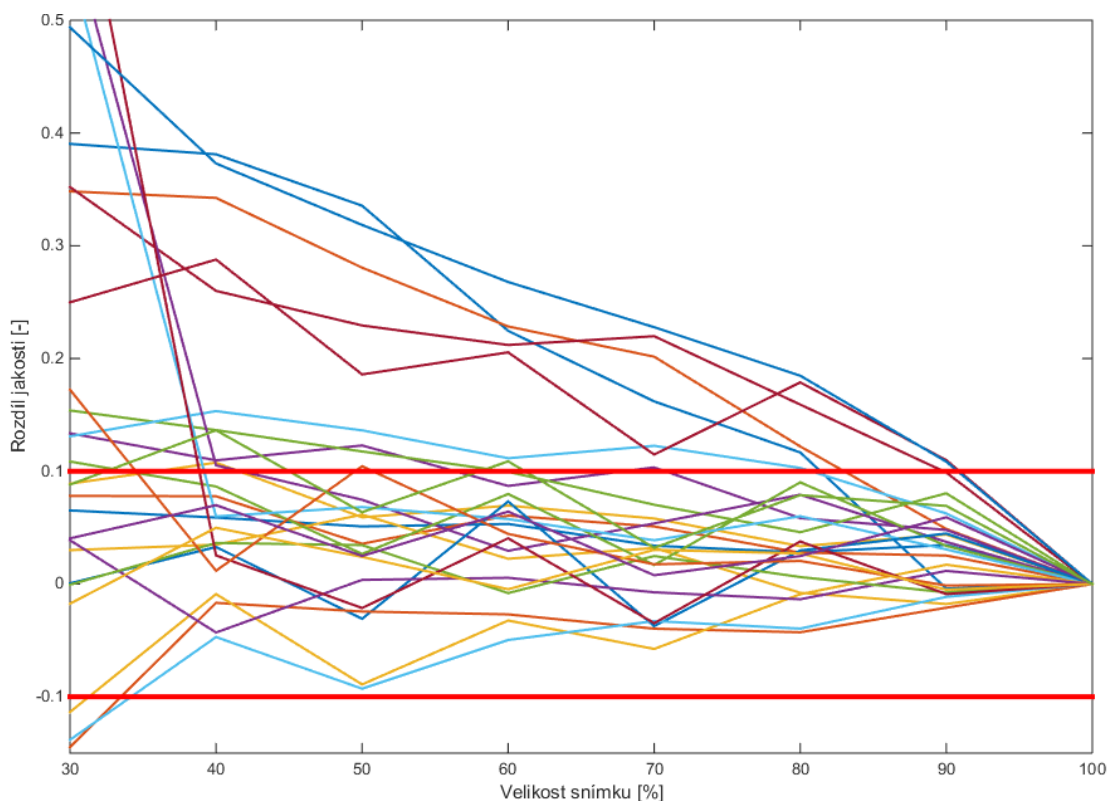
Tab. 5.9 Rychlosti pásu skla při maximální a minimální uvažované tloušťce

Tloušťka skla [mm]	Rychlost pásu	Rychlost [m.min ⁻¹]	Rychlost [mm.s ⁻¹]	Šíře při 3 snímcích/s [mm]	Počet snímků za sekundu pro	
					šíři 270 mm	šíři 260 mm
6	Minimální	9	150	50	0,556	0,577
3	Maximální	19	317	106	1,174	1,219

Další výzkum byl zaměřen na stanovení parametrů snímače (kamery, především rozlišení), specifikaci polohy snímače pro experimentální pracoviště a pro první návrh

zařízení na linku. Pro stanovení potřebných limitů se v tomto případě vycházelo z off-line metody snímání, kdy je pás šíře 3 210 mm a délky 500 mm rozdělen na 3 (respektive 4, pro tloušťku skla nad 6 mm) vzorky šíře 1 070 mm (respektive 800 mm) a snímán postupně, Obr. 5.36. Při analýze celého snímku je zabíraná šířka vzorku současným snímačem reprezentovaná 600 pixely (respektive 500 pixely). Po vynásobení počtem vzorků je získáno 1 800 pixelů při rozdělení pásu na 3 vzorky a 2 000 pixelů při rozdělení pásu na 4 vzorky.

Dalším zpracováním dat byl zkoumán vliv snížení datové velikosti snímků na vypočtenou jakost. Náhodně bylo vybráno 26 vzorků se stanoveným stupněm jakosti v rozmezí 2 až 3,5. U těchto snímků byly sníženy celkové rozměry snímků postupně o 10 %. Vznikla tak řada snímků s velikostí od 10 % po 100 % původního snímku. Tyto snímky byly podrobeny hromadné analýze a byla u nich vypočtena jakost stejně, jako při off-line metodě. Pro lepší zviditelnění rozdílů byly výsledky jakosti po postupném snižování rozměrů odečteny od výsledku pro snímky ve 100% velikosti, Obr. 5.45 (délka přířezu je 1 070 mm).

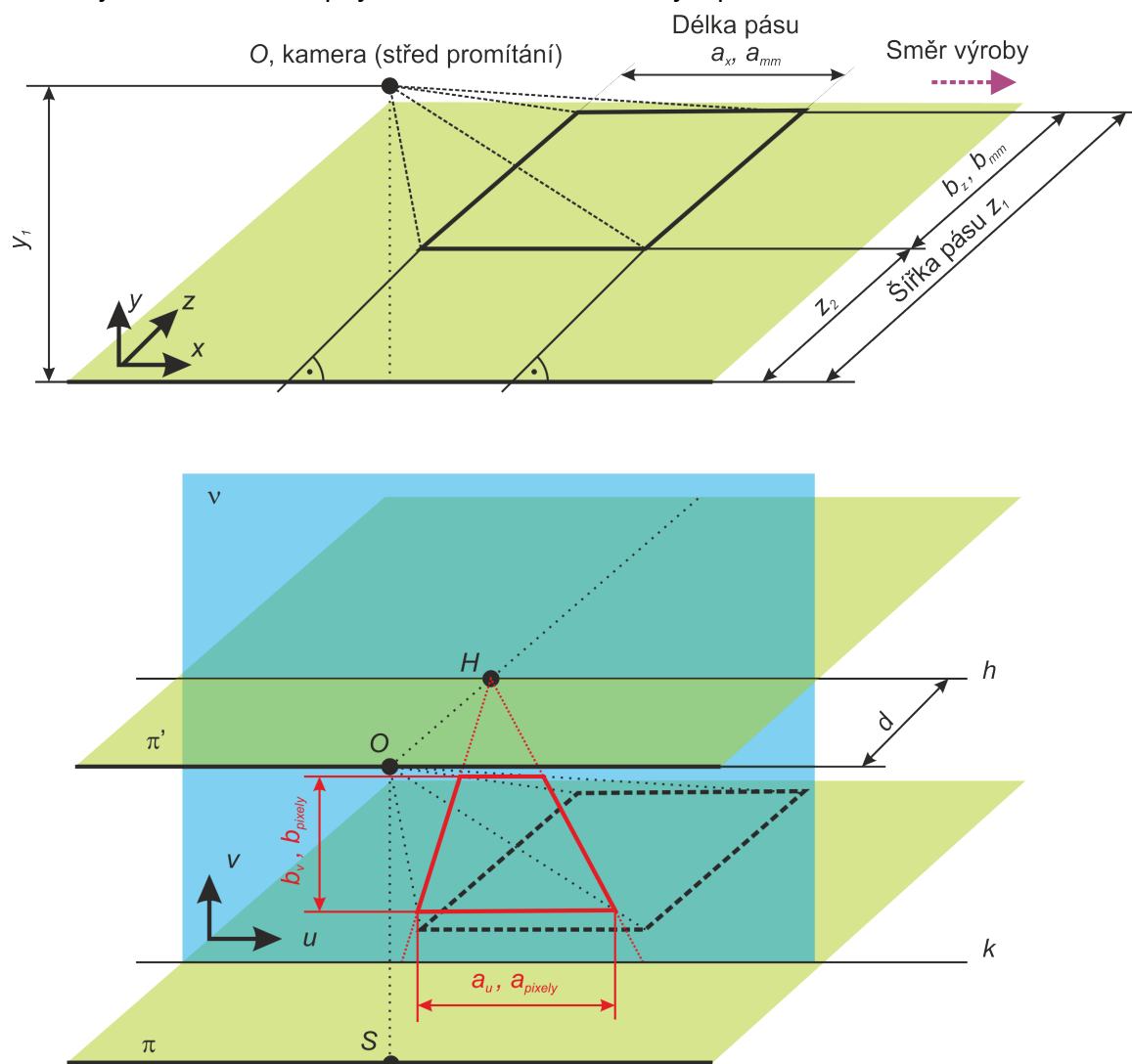


Obr. 5.45 Závislost rozdílu vypočtené jakosti od původního snímku na rozměrech (velikosti) snímku v %

Hodnoty jakosti pod 30 % nebylo možné z důvodu malého rozlišení spočítat. Kladné hodnoty rozdílu jakosti představují pokles čísla jakosti, tedy „zlepšení“ jakosti. V grafu je znázorněna červenou čarou odchylka 0,1 a -0,1 jakostní hodnoty, která je přijatelná. To splňuje pouze snížení rozlišení na 90 %, čemuž odpovídá velikost snímku 540 pixelů, tedy pro celý pás to představuje 1 620 pixelů. Závěr z tohoto hodnocení je, že čip snímacího prvku musí mít minimálně 1 700 pixelů na širší hraně. Vzorky jsou ovšem snímány postupně a měřítko (pixel/mm) je pro každý vzorek znovu zlepšeno. V případě snímání celého pásu bude

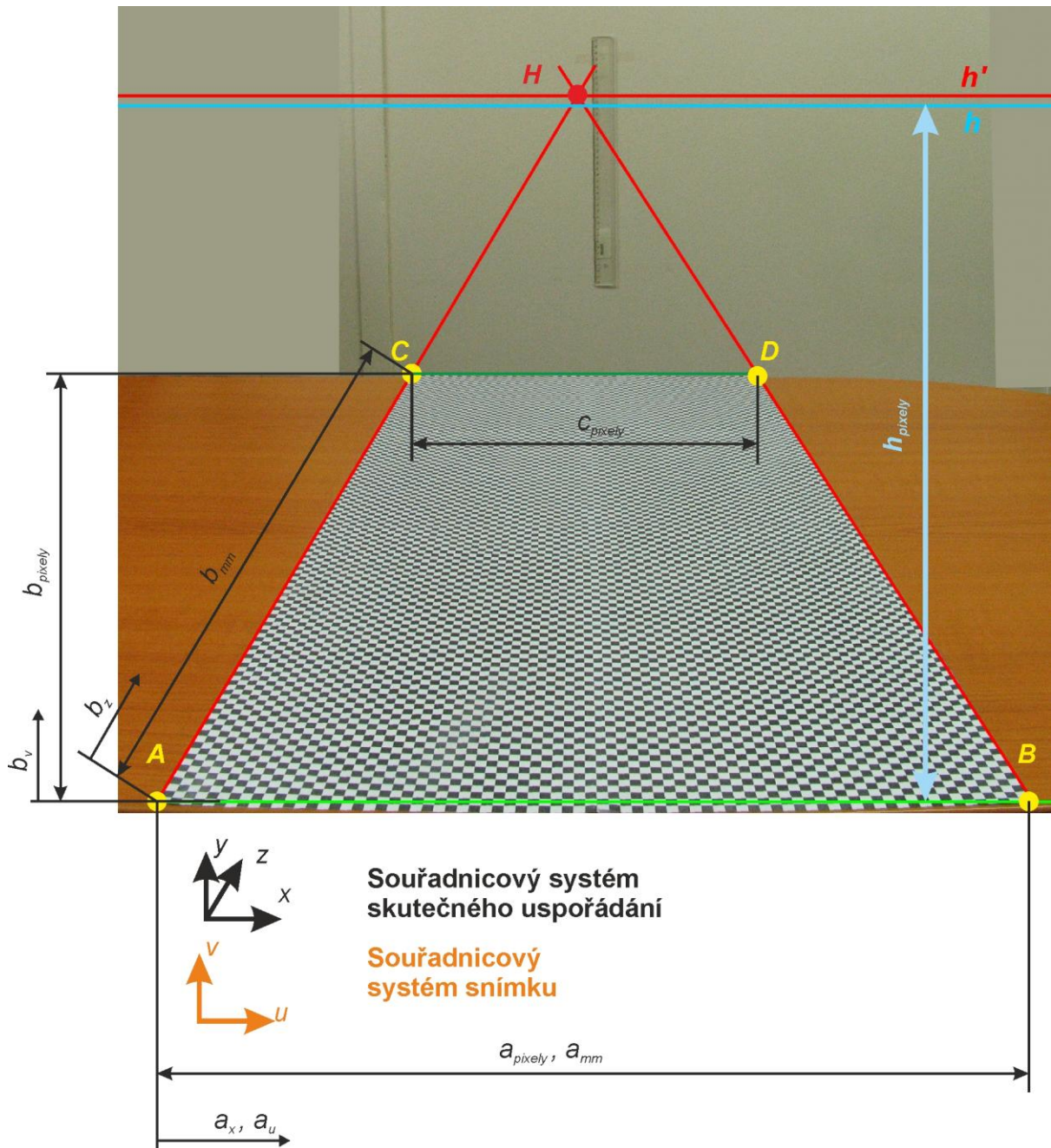
rozhodující měřítko na nejvzdálenějším konci sledované šíře skla. Měřítka (počet pixelů na snímku, které připadají na 1 mm na reálném objektu) na nejvzdálenějším konci pásu od snímače by mělo být v obou případech stejné nebo vyšší pro on-line v porovnání s měřením off-line. Cílem je zajistit detekovatelnost vad na vzdálenějším okraji skla od snímače (kamery).

Pro další vysvětlení problematiky je vhodné si uvědomit souřadnicový systém a zobrazení pásu/vzorku v jednobodové perspektivě, Obr. 5.46. Při snímání vzorku skla off-line i pásu skla on-line na výrobní lince dochází ke změně měřítka se vzdáleností. Tento jev je způsoben snímáním vzorku skla pod úhlem a je tím vyšší, čím je menší úhel snímání. Výsledkem je, že část pásu/vzorku, která je vzdálená nejvíce od snímacího prvku, má nejmenší rozlišení. To představuje nejnižší poměr pixelů na 1 mm (1 mm je reprezentován nejméně pixely), a to jak v ose x (u), tak i v ose z (v). Tento poměr je zde nazván měřítkem. Ve vzdálenějších místech tak dochází ke ztrátě dat více než v místech blíže ke snímači. Vzhledem k metodice off-line corrugation testu lze považovat v rámci testu ztrátu dat na vzdálenějším konci skla za přijatelnou a zároveň limitující pro on-line metodiku.



Obr. 5.46 Stanovení souřadnicového systému a zobrazení pásu/vzorku v jednobodové perspektivě

Byly proto odvozeny funkce závislosti změny měřítka na pozici snímače (kamery) a sledovaného položeného objektu pro osy z a x . Pro ověření stanovené funkce pro změnu měřítka byly provedeny experimenty s šachovnicí, kde každý čtverec měl hranu 5 mm (Obr. 5.47).

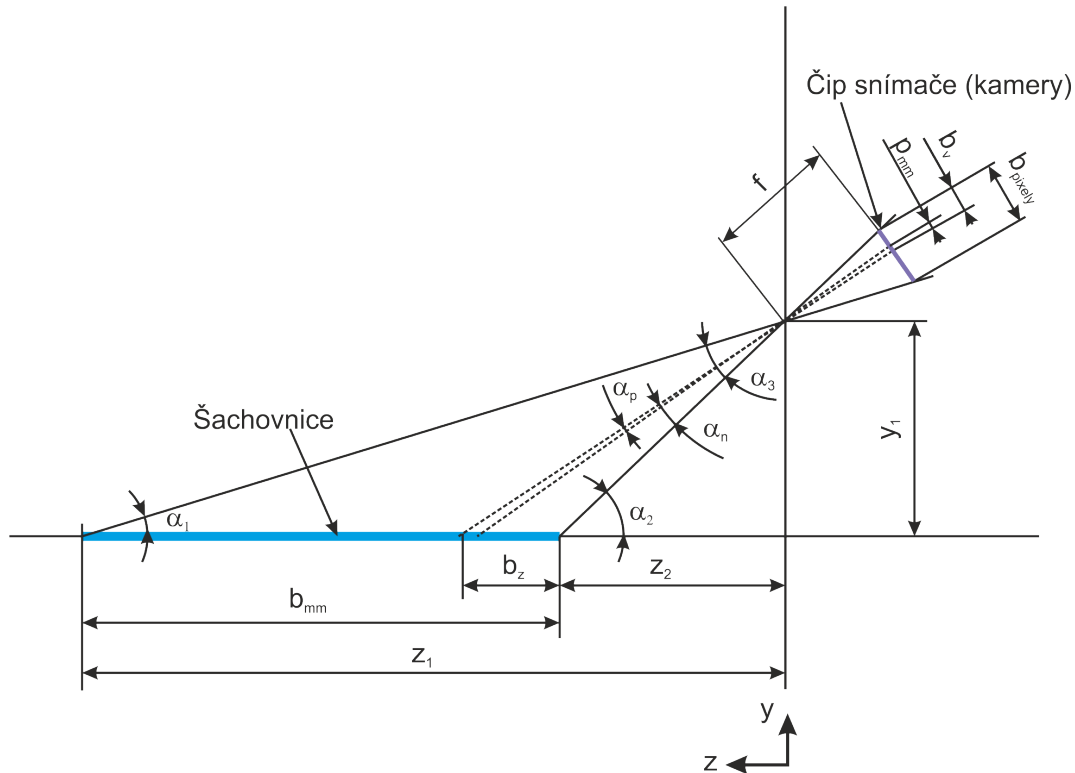


Obr. 5.47 Experiment se šachovnicí, zobrazení souřadnicových systémů a obecně rozměrů

Tyto funkce mají také význam pro nasazení v corrugation testu pro stanovení pozice dané vady v ose z .

Nejprve byla stanovena **funkce měřítka v ose z** , která uvádí vztah mezi vzdáleností na snímku v pixelech v ose v a reálnou vzdáleností snímaného vzorku/pásu skla v mm v ose z (směrem od snímače). Z Obr. 5.47 je zřejmé, že pro takto stanovené souřadnicové systémy se měřítko získaného snímku pro osu z v ose u nemění. Problematiku tak lze v tomto případě

zjednodušit podle schématu na Obr. 5.48. Funkce je částečně zjednodušena, je počítáno s optikou s pevnou ohniskovou vzdáleností a s předpokladem, že čip snímáče je kolmý na střed snímané oblasti.



Obr. 5.48 Schéma umístění snímacího prvku (fotoaparátu) při snímání šachovnice pod úhlem

Funkce vzdáleností na snímku v pixelech b_v na reálné vzdálenosti na snímané šachovnici b_z v mm odvozená na základě elementární geometrie má tvar:

$$b_z = \frac{y_1}{\tan(\alpha_2 - b_v \alpha_p)} - z_2 \quad (5.7)$$

kde zorný úhel jednoho pixelu α_p lze vypočítat z velikosti pixelu p_{mm} v mm a ohniskové vzdálenosti f v mm:

$$\alpha_p = \arctg \frac{p_{mm}}{f} \quad (5.8)$$

Pro výpočet lze použít zorný úhel snímáče α_s a velikost dané hrany snímáče v pixelech $v_{s \text{ pixel}}$

$$\alpha_p = \frac{\alpha_s}{v_{s \text{ pixel}}} \quad (5.9)$$

Úhel jednoho pixelu α_p je také možné spočítat z úhlu α_3 a počtu pixelů analyzované šířky skleněného pásu b_{pixely} , Obr. 5.48

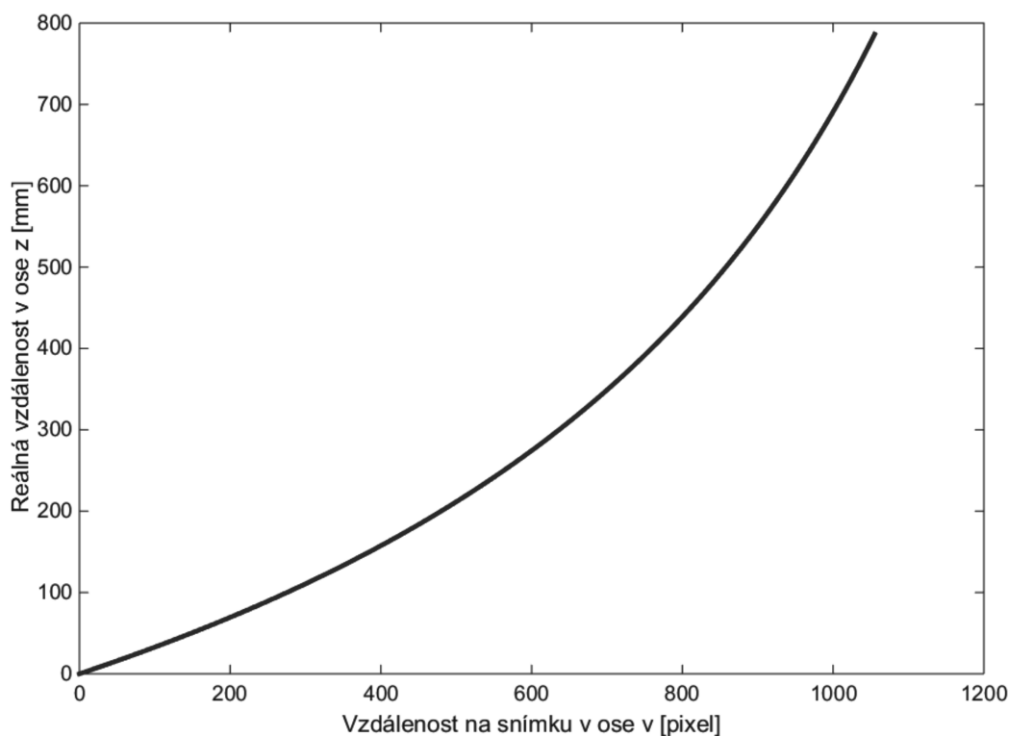
$$\alpha_p = \frac{\alpha_3}{b_{pixely}} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{b_{pixely}} \quad (5.10)$$

kde úhly α_1 a α_2 lze vypočítat z

$$\alpha_1 = \arctg \left(\frac{y_1}{z_1} \right), \alpha_2 = \arctg \left(\frac{y_1}{z_2} \right) \quad (5.11)$$

Vzdálenosti z_1 , z_2 a y_1 v mm jsou známy a jsou dány polohou snímacího prvku (čipu kamery) a jsou zřejmé z Obr. 5.48, b_{pixel_y} je celková relativní délka šachovnice na pořízeném snímku v pixelech, tu je možné změřit a je také známa, b_v značí n -tý pixel šachovnice na snímku (vzdálenost na snímku v pixelech v ose v), α_3 značí zorný úhel šachovnice, α_p je „zorný úhel jednoho pixelu“, α_n je „zorný úhel n pixelů“. Bylo ověřeno, že α_p je možné považovat za konstantní pro daný rozsah a podmínky měření (objektiv s pevnou ohniskovou vzdáleností nebo pro nastavení stejného přiblížení u objektivu s proměnnou ohniskovou vzdáleností).

Byl proveden experiment s polohou kamery ve výšce $y_2 = 290$ mm nad pozorovanou oblastí. Byla tak získána (podle vztahu 5.7) a ověřena (počítáním na pořízeném snímku) funkce zobrazená na Obr. 5.49. Tyto funkce mají význam pro nasazení v corrugation testu pro stanovení pozice dané vady v ose z .

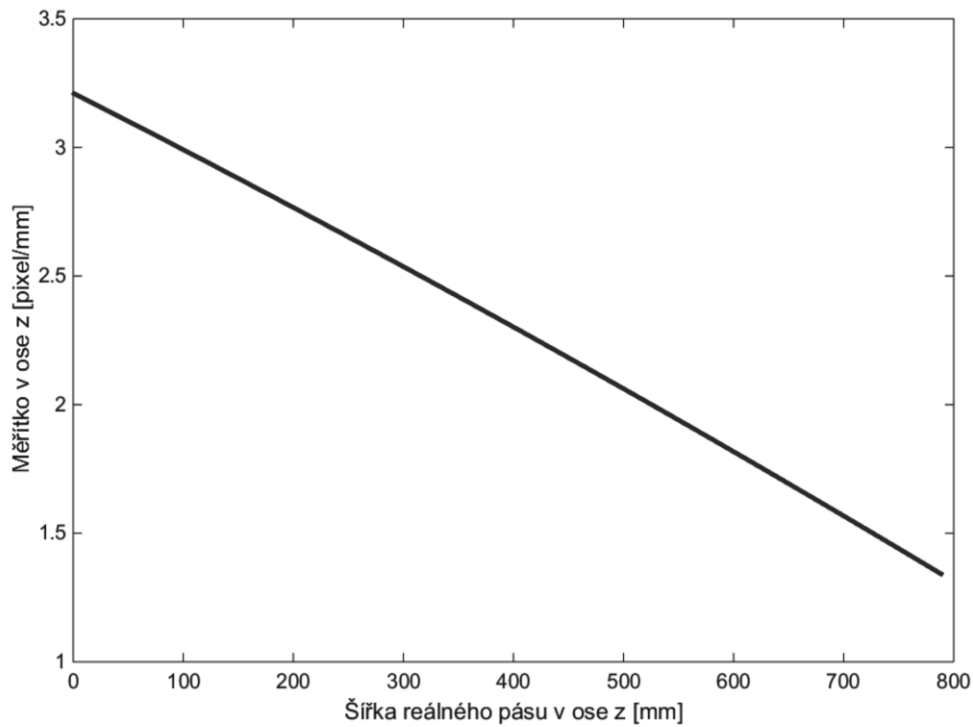


Obr. 5.49 Graf závislosti vzdálenosti na šachovnici v mm (v ose z) na vzdálenosti na snímku v ose v v pixelech

Z výsledků je zřejmé, že se vzdáleností v ose z se mění také měřítko (rozlišení, počet pixelů na 1 mm). Tím, jak je šachovnice vzdálenější, připadá na 1 mm méně pixelů, měřítko klesá. Měřítko m_v se mění s každým pixelem n a lze ho vypočítat ze vztahu:

$$m_{v\ n} = \frac{b_{v\ n}}{b_{z\ n}} \quad (5.12)$$

Je tak možné získat funkci změny měřítka se vzdáleností v ose z v mm, Obr. 5.50.



Obr. 5.50 Graf závislost měřítka m_v v ose z na skutečné vzdálenosti na šachovnici v ose z v mm

Na Obr. 5.47 je vidět, že ke změně měřítka dochází také v ose x . Pro získání **funkce měřítka v ose x** byl nejprve získán horizont h . Ze snímku je možné nalezení hlavního bodu H pomocí dvou hloubkových přímek, kdy každou je možné získat ze dvou bodů (A, C a B, D). Hlavním bodem prochází horizont h' (červená úsečka na Obr. 5.47), který je rovnoběžný s osou u snímku. Horizont je možné také vypočítat nalezením limity funkce mezi reálnou vzdáleností v ose x a relativní vzdáleností na snímku v pixelech v ose v :

$$h_{pixely} = \lim_{b_z \rightarrow \infty} (b_z) = \lim_{b_z \rightarrow \infty} \frac{\alpha_2 - \arctg\left(\frac{y_1}{b_z}\right)}{\alpha_p} \quad (5.13)$$

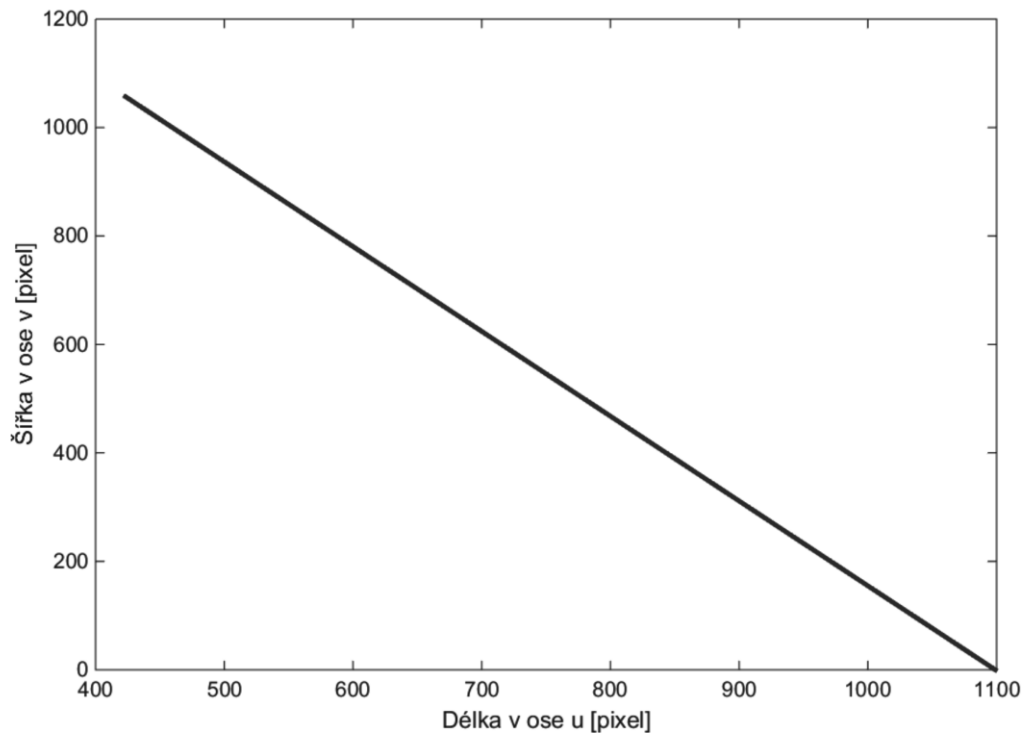
kde h_{pixely} je výška horizontu v ose v (v pixelech), b_z je reálnou vzdáleností na snímané šachovnici v mm, vzdálenost y_1 v mm a úhel α_2 je dán polohou snímáčího prvku a je zřejmé z Obr. 5.48, α_p je „zorný úhel jednoho pixelu“.

Vypočtená pozice horizontu h je zobrazena modře a odpovídá skutečné pozici horizontu (umístěný ve stejné výšce jako fotoaparát). Rozdíl mezi skutečným horizontem h a horizontem h' získaným ze dvou hloubkových přímek je dán zkreslením optiky. Jedná o vliv distorze, která se mimo jiné viditelně projevuje „prohnutím“ úsečky mezi body A a B na snímku. Při hodnocení byl vliv distorze eliminován obrazovou transformací.

Pomocí odměřené délky a_{pixely} , vypočtené délky h_{pixely} (pixelech) a změny délky b_v (funkce vzdálenosti v ose v pořízeného snímku v pixelech) je možné stanovit funkci pro vzdálenost a_u na snímku v (pixelech):

$$a_u = \frac{h_{pixely} - b_v}{h_{pixely}} \cdot a_{pixely} \quad (5.14)$$

Vzdálenost a_x je v tomto případě stále stejná, neboť zabíraná délka pásu skla se nemění. Funkce mezi vzdálenostmi na snímku v pixelech a_u a b_v je pro šachovnici lineární a je zobrazena na Obr. 5.51.

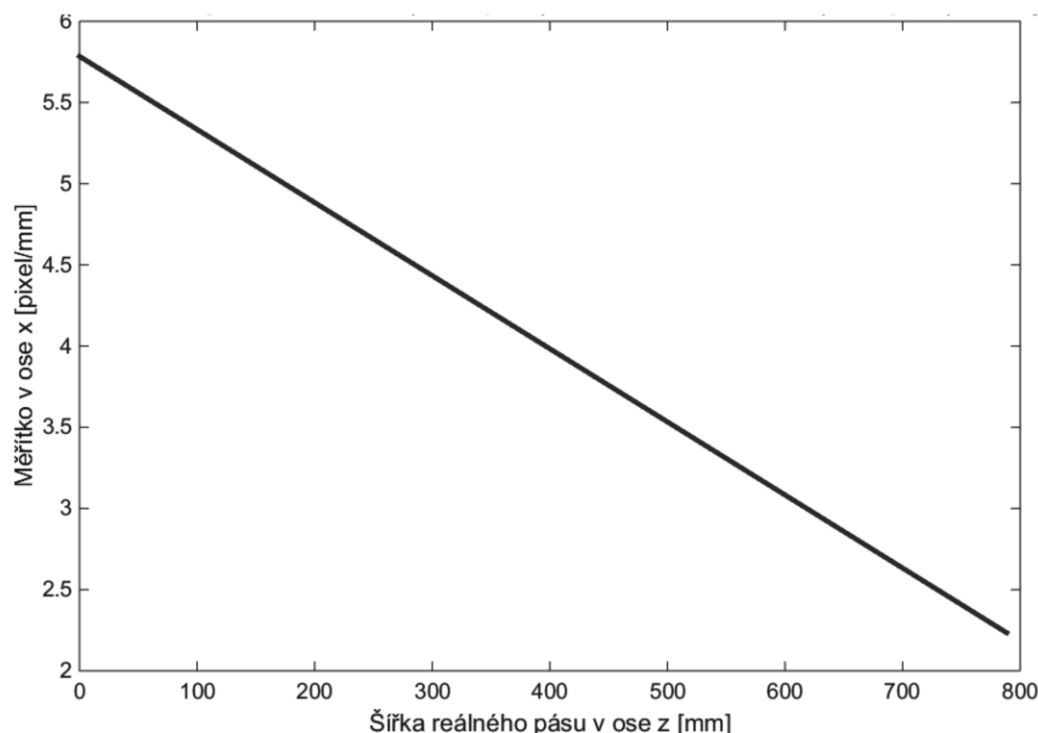


Obr. 5.51 Graf závislosti vzdálenosti v ose v na vzdálenosti v ose u

Z funkce a_u je možné stanovit funkci změny měřítka v ose x se vzdáleností v ose z (šířky pásu) ze znalosti skutečné délky pásu šachovnice $a_x = a_{mm}$. Měřítka (rozlišení) m_u se mění s každým pixelem n v ose snímku v a lze ho vypočítat z

$$m_{u\ n} = \frac{a_{u\ n}}{a_{mm}} \quad (5.15)$$

V šířce snímku (v ose u) se měřítko nemění a je stejné pro všechny pixely (ideálně). Závislost měřítka m_u na skutečné vzdálenosti (šířce pásu) na šachovnici v mm (v ose z) je uvedena na Obr. 5.52.

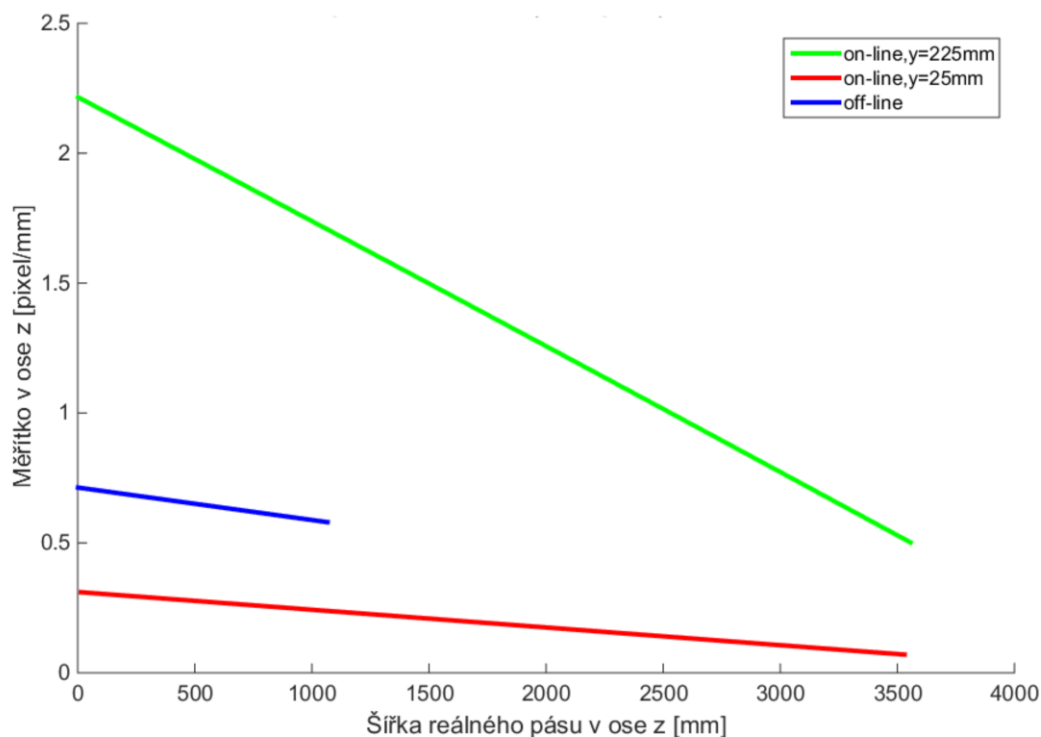


Obr. 5.52 Graf závislosti měřítka m_u v ose x na skutečné vzdálenosti na šachovnici v ose z v mm

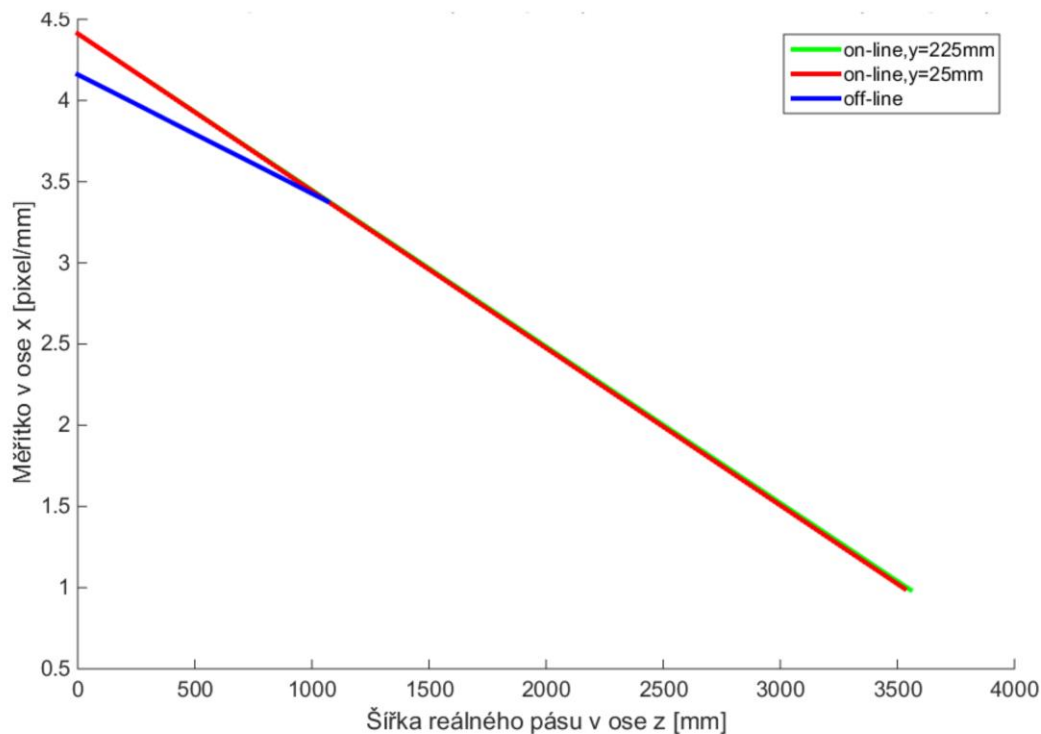
Výše uvedené funkce a výpočty měřítek byly následně ověřeny na kalibrovaných snímcích (pomocí geometrických transformací), aby byla odstraněna deformace obrazu daná především objektivem.

Jak již bylo výše napsáno, uvedené vztahy jsou důležité pro lokalizaci dané vady na skutečném pásu skla a také pro dodržení podmínky minimálního měřítka z off-line metodiky u on-line měření. Na Obr. 5.53 a Obr. 5.54 je uvedeno porovnání průběhu závislostí měřítka pro off-line metodiku a navrhovanou on-line metodiku. Pozice kamer pro on-line řešení je uvedena ve dvou extrémech, které byly použity při testech se sérií odrazových ploch na lince (kap. 5.2.3.1, tab. 6.7). Pro výšku kamery nad pásem je uvažováno s rozlišením snímače (snímací plochy) pro $y = 25$ mm: 1800×243 pixelů ($u_{s\text{ pixel}} \times v_{s\text{ pixel}}$) a pro $y = 225$ mm: 1800×1780 pixelů.

Pro hodnocení jakosti on-line při zachování podobných algoritmů by mělo být použito minimálně stejného nebo většího měřítka jako u off-line metodiky.



Obr. 5.53 Graf závislosti měřítka m_z v ose z (šířka pásu) na vzdálenosti v ose z pro experimentální on-line a off-line řešení



Obr. 5.54 Graf závislosti rozlišení v ose x (délka pásu) na vzdálenosti v ose z (mm) pro experimentální on-line a off-line řešení

Jak je zřejmé z uvedených grafů s měřítky a hodnot v Tab. 5.10, pro stanovený požadavek stejného nebo vyššího měřítka na vzdálenější straně pásu nevyhovuje žádné z experimentálních měření nad pásem skla (kap. 5.2.3.1). Pro umístění kamery nad pásem skla ve výšce 225 mm je měřítko v ose z na přední hraně vyšší než u off-line měření, ale na zadní je nižší. Především poloha snímáče v ose y (včetně jeho rozlišení v ose v) rozhoduje o měřítku na bližší hraně pásu (při zachování dané šíře pásu). U sledované zadní hrany nemá poloha kamery v ose y vliv na rozlišení v ose z . Vliv naopak mají parametry rozlišení snímáče v ose v ($v_{s\text{ pixel}}$) a šíře sledovaného pásu. Protože šíře pásu nemůže být kratší (je nutné sledovat jakost celé šíře skla), je nutné zvýšit rozlišení snímáče ($v_{s\text{ pixel}}$), přesněji snímací plochy na snímáči. Minimum pro dosažení stejného měřítka pro uvedené uspořádání $y=225$ mm v ose z je $v_{s\text{ pixel}} = 2\,058$ pixelů (proti původním $v_{s\text{ pixel}} = 1\,780$).

Tab. 5.10 Porovnání off-line a on-line metodiky na základě měřítka na počátku a konci sledovaného vzorku/pásu

	Osa z , počátek [pixel/mm]	Osa z , konec [pixel/mm]	Osa x , počátek [pixel/mm]	Osa x , konec [pixel/mm]
Off-line	0,71	0,58	4,16	3,38
On-line $y = 25$ mm (tab. 6.7)	0,31	0,07	4,41	0,99
On-line $y = 225$ mm (tab. 6.7)	2,22	0,5	4,41	0,99
On-line řešení na půlku pásu (kap. 5.2.4)	2,25	1,33	7,36	4,24

Rozlišení v ose x je pro obě výšky v rámci experimentu stejné. Rozlišení v této ose není závislé na poloze snímáče v ose y . Počáteční hodnota je závislá na délce snímaného pásu v ose x a počtu pixelů v ose u . Sklon a konečná hodnota je závislá na šířce pásu a vzdálenostech v ose z (zvětšení vzdáleností z_1 a z_2 zvýší měřítko na vzdálenější hraně sledovaného pásu, $a_{\text{pixel}y}$). Měřítka v ose x je vhodné ovlivnit rozlišením snímáče (zvětšením snímané oblasti na snímáči) a zúžením pozorované délky. Zde je však limitujícím faktorem dostatečně dlouhá křivka získaná z odrazové desky pro analýzu zvlnění. Logické je tak pouze zvýšení rozlišení snímáčem. Minimum pro dosažení stejného měřítka v ose x je $v_{s\text{ pixel}} = 6\,166$ pixelů (proti původním $v_{s\text{ pixel}} = 1\,780$).

5.2.4 Základní koncepce zařízení

Požadavky na zařízení jsou následující:

- zajistit stanovené limity v rozlišení snímku,
- monitorovat celou šíři pásu,
- respektovat zástavbové možnosti na výrobní lince,
- minimalizovat použití pohyblivých systémů,
- zajistit spolehlivé a robustní snímání s vyhodnocením s minimalizací zásahů údržby,
- zajistit minimalizaci vlivů (především světelných) z okolí.

Na základě výpočtů zjištění v předchozí kapitole byl proveden návrh umístění snímače, jeho parametrů (rozlišení, provedení, objektiv, ...), byla specifikována poloha a velikost odrazové desky a stanoveno celkové upořádání. Byla volena pouze možnost umístění zařízení pod pás skla na výrobní lince, a to vzhledem k zástavbovým možnostem, horší jakosti spodní strany pásu skla (po kontaktu s cínovou lázní) a nutnosti omezení okolního světla (které se v průběhu dne významně mění).

Technické omezení prostoru pod linkou umožňuje návrh dvou základních variant, a to za použití kamer s plošným senzorem anebo kamery řádkové. Jak předchozí výzkum ukázal (limity rozlišení vzdálenější hrany) je nutné v případě kamery s plošným senzorem použít dvě a z toho vyplývají i dvě možnosti uspořádání těchto kamer. Varianty je možné rozdělit takto:

- 1.A Dvě kamery (s plošným čipem 2 448 x 2 050 pixelů) zrcadlově uspořádány proti sobě, snímající vzdálenější část pásu. Z toho vyplývá i nutnost použití dvou odrazových desek.
- 1.B Dvě kamery (s plošným čipem 2 448 x 2 050 pixelů) umístěné pod sebou a snímající pod různým úhlem, které využívají pouze jednu odrazovou desku.
- 2 Řádková kamera (se senzorem 8 000 pixelů), kde dochází k postupnému generování obrazu. Specifikem této varianty je úzká odrazová deska, která musí umožňovat generování proměnného obrazu. Tedy obraz pruhů se musí postupně posouvat, aby se generovaly na vzniklém obraze šikmé pruhy.

Pro výpočet parametrů byl připraven software, který stanoví příslušné rozměry a vzdálenosti pro určenou polohu kamery. Vedle mnoha limitujících parametrů daných zastavěním linky se ukazují jako kritické následující:

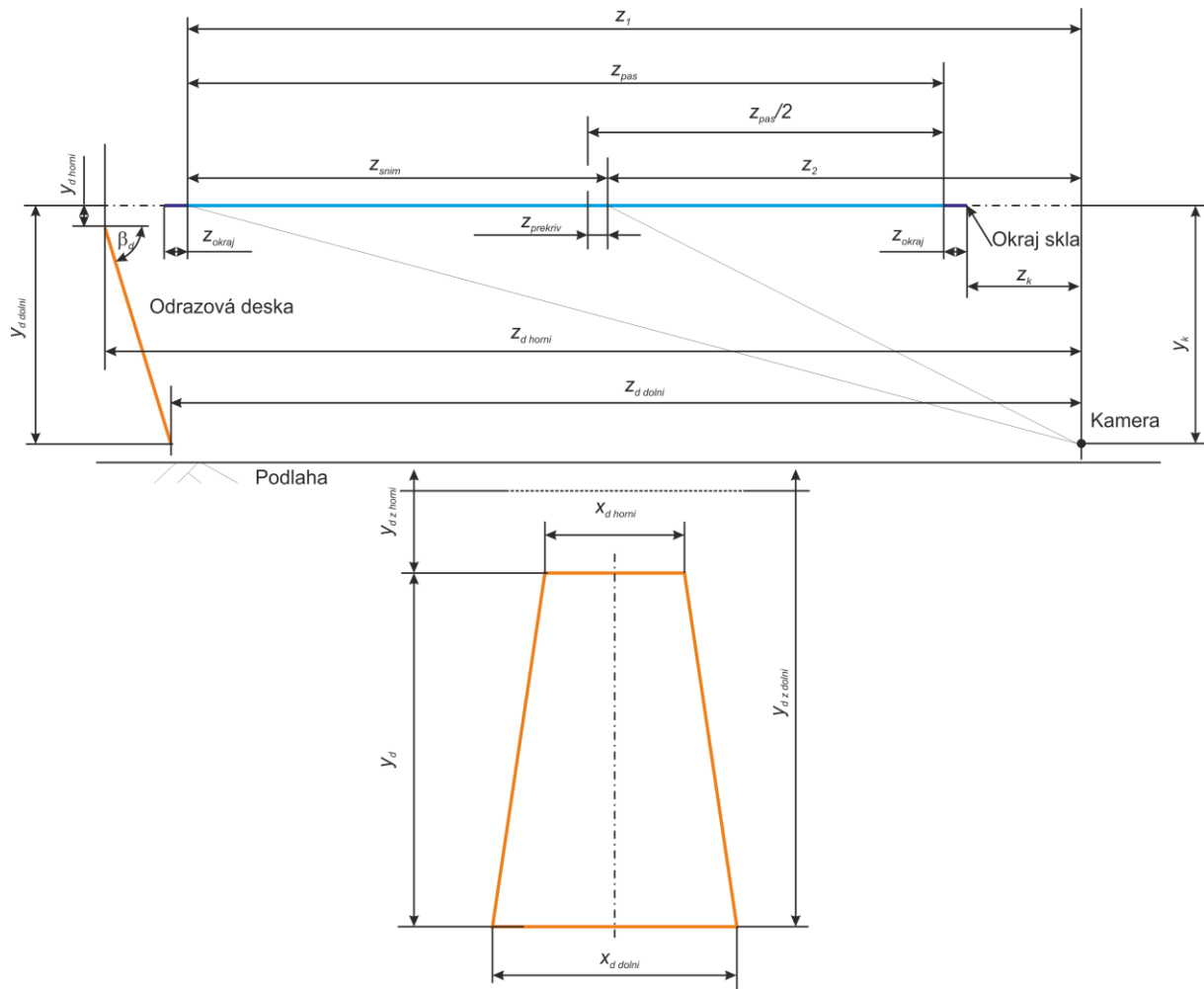
- a) Kritické je umístění horní hrany pod sklem vzhledem k zastavění horní části transportními válci a zasahující do hloubky pod pásem skla $y_{d\text{ horní}}$ (osa y) minimálně 135 mm. Druhým kritickým bodem je umístění spodní hrany vzhledem k podlaze, $y_{d\text{ dolní}}$. Prostor mezi sklem a podlahou má hloubku 1 100 mm od pásu skla. Při nutnosti položit hranu níže než je umožněno daným prostorem, je možno desku celou naklonit a její sklon je definován úhlem β_d .
- b) Ohnisková vzdálenost pro osu z musí být menší než ohnisková vzdálenost pro

osu x . Jde vlastně o zorný úhel, který musí vycházet větší pro osu z , protože pro osu x bude použit logicky stejný úhel, kde část nepotřebného snímaného záběru bude oříznuta.

V Tab. 5.11 vychází z předpokládané technické i cenové dostupnosti.

Tab. 5.11 Stanovené a vypočtené parametry pro kameru, objektiv a desku a jejich umístění

Uspořádání	Parametr	Označení	Dvě kamery naproti sobě	Dvě kamery vpravo, kamera 1	Dvě kamery vpravo, kamera 2	Řádková kamera
Velikost zobrazení na čipu a pozice kamery	šířka (osa v) [mm]	$v_s \text{ mm}$	7.6	7.6	7.6	40
	délka (osa u) [mm]	$u_s \text{ mm}$	6.36	6.36	6.36	0.005
	poměr hran [-]		1.19	1.19	1.19	0
	šířka (osa v) [pixely]	$v_s \text{ pixel}$	2 200	2 200	2 200	8 000
	délka (osa u) [pixely]	$u_s \text{ pixel}$	1 841.1	1 841.1	1 841.1	1
	pozic kamery v ose z [mm]	z_k	300	410	410	410
	pozic kamery v ose y [mm]	y_k	1 000	170	1000	160
Pás skla	šíře pásu v ose z [mm]	z_{pas}	3 430	3 430	3 430	3 430
	okraj – bort z (bez měření) [mm]	z_{okraj}	100	100	100	100
Snímaná oblast	překryv záběru kamer na pásu skla [mm]	$z_{prekriv}$	35	35	35	35
	vzdálenost vzdálenějšího okraje skla [mm]	z_1	3 630	2 160	3 740	3 740
	vzdálenost bližšího okraje skla [mm]	z_2	1 980	510	2 090	510
	snímaná šíře pásu [mm]	z_{snim}	1 650	1 650	1 650	3 230
	snímaná délka pásu [mm]	x_{snim}	250	270	270	0.0351
Pozice odrazové (světelné) desky	vzdálenost horní hrany desky [mm]	$y_d \text{ horni}$	166.67	163.70	133.69	17.11
	vzdálenost dolní hrany desky [mm]	$y_d \text{ dolni}$	987.92	1 039.03	804.10	993.52
	vzdálenost horní hrany desky [mm]	$z_d \text{ horni}$	4 235	4 240	4 240	4 140
	vzdálenost dolní hrany desky [mm]	$z_d \text{ dolni}$	3 875.43	3 512.46	676.96	3 676.71
	úhel naklonění [°]	β_d	70	55	55	65
Rozměr desky	výška desky [mm]	y_d	873.96	1 068.58	818.42	1 077.34
	délka horní hrany desky v ose x [mm]	$x_d \text{ horni}$	291.56	529.32	305.97	0.04
	délka dolní hrany desky v ose x [mm]	$x_d \text{ dolni}$	488.80	1 821.87	474.48	0.25
	výška zakreslení horní hrany [mm]	$y_d \text{ z horni}$	166.67	163.70	133.69	17.11
	výška zakreslení dolní hrany [mm]	$y_d \text{ z dolni}$	1 051.33	1 268.42	981.63	1 096.23
Objektiv	ohnisková vzdálenost pro osu z [mm]		38.09	31.09	40.96	152.24
	zorný úhel pro osu z [°]		11.39	13.93	10.60	14.97
	ohnisková vzdálenost pro osu x [mm]		56.43	12.66	54.58	0
	zorný úhel pro osu x [°]		6.4506	28.1935	6.6694	0



Obr. 5.55 Schéma uspořádání kamery a odrazové světelné desky pod linkou a popis měr uvedených v Tab. 5.11

Na základě výpočtů z uvedené tabulky (Tab. 5.11) a uvedeného schéma (Obr. 5.55) je možné provést tyto závěry:

- 1) Dvě kamery s plošným senzorem 2 448 x 2 050 pixelů umístěné naproti sobě ve stejném upořádání. Kamery jsou otočeny o 90°, aby širší hrana senzoru zabírala šířku skla. Každá z kamer snímá vzdálenější pás skla, přesněji odraz stacionární promítací desky (bez pohybu pruhů) stejného tvaru. Tvar této desky je podle výpočtu limitován několika parametry. Délka horní hrany $x_{d \text{ horni}}$ uvádí minimální velikost promítací desky na horní hraně, délka dolní hrany $x_{d \text{ dolni}}$ je minimem pro spodní část. Deska by měla být přesto větší vzhledem k možnému zkreslení objektivem kamery. Z návrhů vyplývá, že desky musí být vzhledem k zastavení vždy naklopeny.
- 2) Dvě kamery s plošným senzorem 2 448 x 2 050 pixelů pouze na pravé straně linky. Při tomto řešení se objevuje několik omezení, jak je zřejmé z vyznačení v Tab. 5.11 (oranžově). Za prvé, jedná se o porušení minimální hloubky odrazové desky pod sklem u kamery 2. Za druhé, velký rozdíl mezi ohniskovými vzdálenostmi v neprospěch osy x u kamery 1. Za třetí, rozměr nakloněné desky je velký a také nakloněním zasahuje pod pás skla.

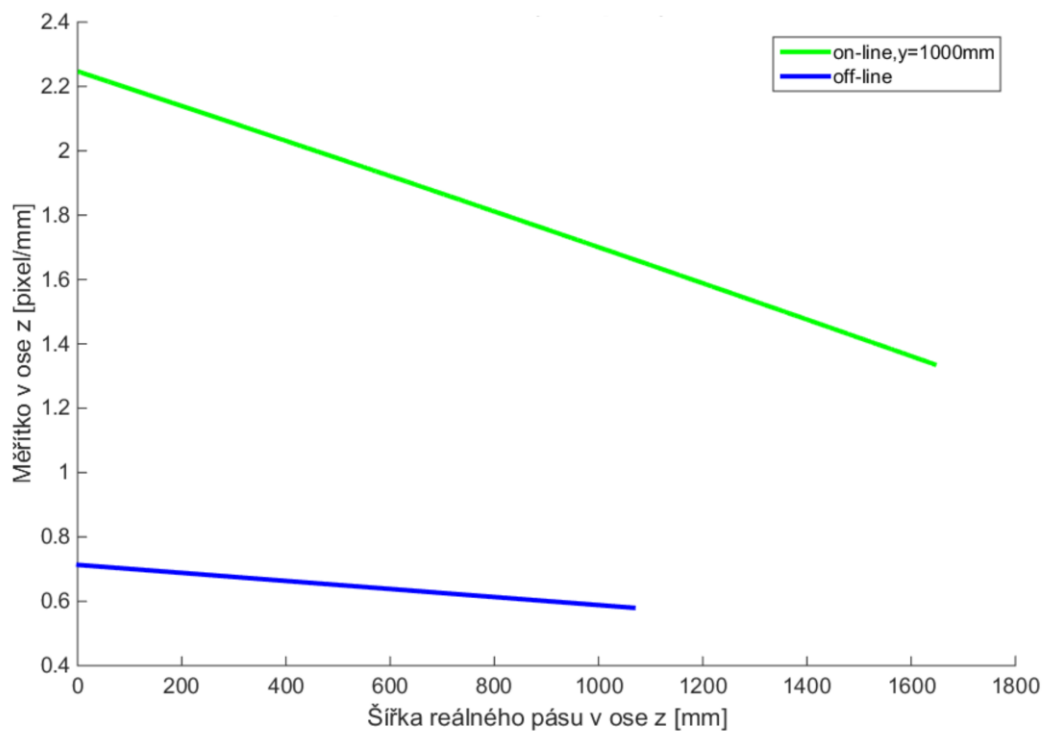
3) Řádková kamera se senzorem 8 000 x 1 pixel. Toto uspořádání vyžaduje úzký pohyblivý pás odrazové desky v šíři několika desítek milimetrů. To je také jedním z limitujících faktorů pro tuto variantu. Řešení je možné pomocí mechanického pásu, jehož pohyb bude sladěn s rychlostí pohybu skla. Bylo zvažováno také použití LCD obrazovky, která by byla řízena elektronicky na základě údajů o rychlosti skla. Bylo by nutné použít monitor s rozlišením 16 000 pixelů na širší hranu (dvojnásobek rozlišení kamery s odkazem na Shannonovu větu o vzorkování [14]). V současné době se začínají vyskytovat monitory 8K Ultra HD s počtem pixelů 7 680 × 4 320, což pro dané řešení není stále dostatečné.

Z výsledků vyplývá, že s ohledem na dostupnost a cenovou přijatelnost je nejvhodnější variantou umístění dvou kamer (varianta 1A). Varianta samozřejmě vyhovuje požadavku na minimální měřítko na vzdálenější hraně skla pro osu x a z (Obr. 5.56, Obr. 5.57 a Tab. 5.10).

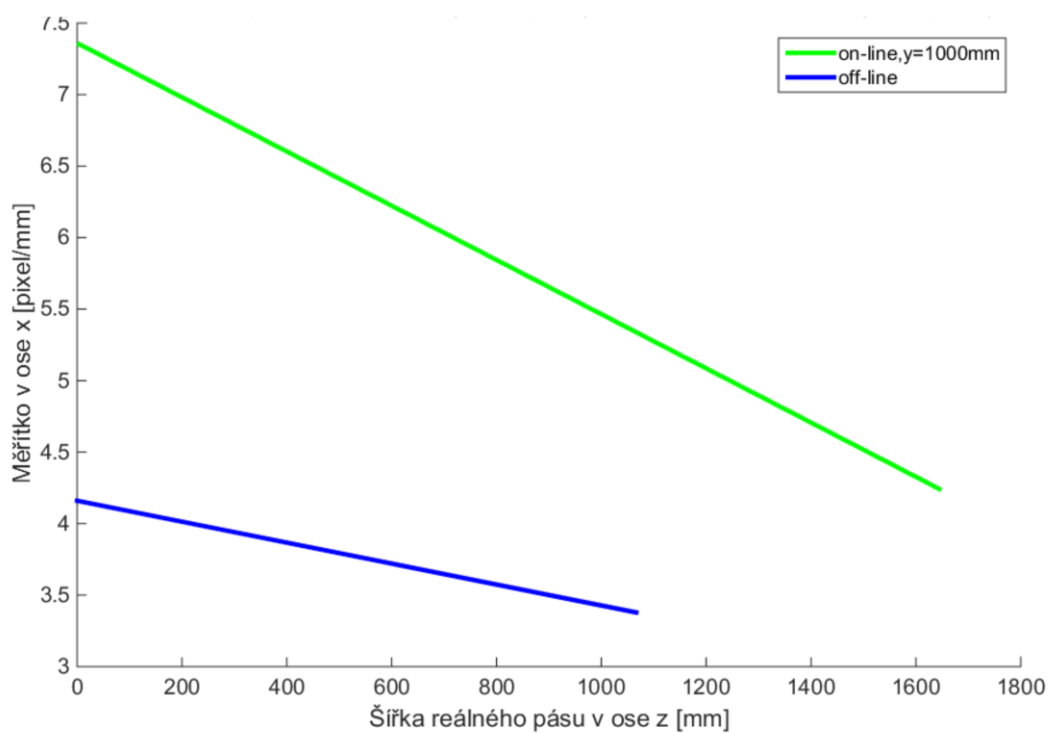
5.2.5 Realizace experimentálního zařízení pro zkušební provoz on-line hodnocení corrugation testu

Na základě výše uvedených úvah a výpočtů bylo navrženo experimentální zařízení. Postačujícím řešením pro ověření a experimenty se ukázalo použití pouze jedné kamery, tedy polovičního zařízení, snímající polovinu vyráběného pásu skla. Požadavky na experimentální zařízení byly následující (přenesené z části i na následující návrh provozního zařízení):

- zařízení nesmí zasahovat pod pás vyráběného skla, obsluha a změna nastavení zařízení nesmí být prováděna pod linkou,
- snadná montáž na linku s využitím svarových spojů,
- možnost změny polohy odrazové světelné desky napříč směru výroby (osa z) a jejího náklonu,
- rozptýlené světlo vycházející ze zebra-desky s plynulým nastavením intenzity podsvícení odrazové světelné desky (osvětlení LED),
- minimalizovat tloušťku odrazové desky s horní hranou přes zebra-desku max. 15 mm zakrytí světelné plochy od rámu desky,
- možnost výměny zebra-desky odrazové desky (motivů na desce),
- možnost změny polohy a clony kamery (dobře přístupná kamera),
- snadno odnímatelné stínítko nad pásem skla (zakrytí pozadí snímaného pásu),
- snadné odstavení zařízení při neočekávaných událostech,
- zamezení jakéhokoliv narušení výroby zařízením (např. odpadání částí vlivem vibrace),
- minimalizovat (lépe vyloučit) mechanické změny zařízení (i automatické) při změně sortimentu výroby (tloušťka skla),
- umožnit bezproblémový náběh výroby při přerušení pásu skla (např. po přebarvení).



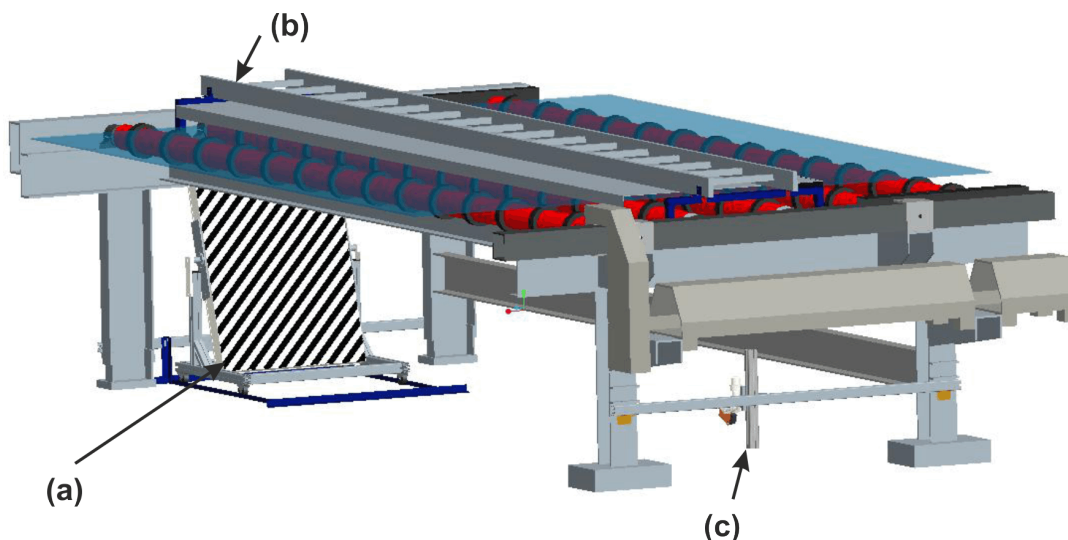
Obr. 5.56 Graf závislosti rozlišení v ose z (šířka pásu) na vzdálenosti v ose z (mm) pro off-line a použité on-line řešení



Obr. 5.57 Graf závislosti rozlišení v ose x (délka pásu) na vzdálenosti v ose z (mm) pro off-line a použité on-line řešení

Na základě výše uvedené specifikace a podmínek bylo navrženo zařízení, které se skládá ze tří hlavních částí, Obr. 5.58:

- flexibilní odrazová světelná zebra-deska s rámem a s vedením připevněným k lince (a),
- odnímatelné stínítko pásu skla s nosným rámem a rámem pro uchycení k lince (b),
- stativ kamery s převodovou hlavou připevněný k rámu (c).



Obr. 5.58: Model celého zařízení (a) flexibilní odrazová světelná deska, (b) odnímatelné stínítko pásu skla, (c) stativ kamery

5.2.5.1 Flexibilní odrazová světelná deska

Konstrukce a zdroj světla odrazové desky byly vybrány po několika experimentech. Při stanovení vhodného zdroje bylo nutné vycházet ze světelného toku světelné desky pro off-line měření. Světelný tok musí být dále vyšší, neboť je nutné počítat s vlivem okolního světla (zařízení nebude z technických důvodů uzavřeno). Jako světelný zdroj byl zvolen LED pásek 120W POWER FLEXI, 840 lm/m, 18 W/m, DC 12V, (maximální světelný tok při osazení 10 m pásky je 8 400 lm, a výkon 180 W). Pásky se snadno připevňují pomocí samolepící vrstvy, je možné zvolit flexibilně jejich rozmístění uvnitř boxu odrazové světelné desky a umožňují případné rozšíření.

Při použití LED pásků se ve své podstatě jedná o osvětlení s mnoha bodovými zdroji, je proto nutné zajistit optimální rozptyl světla tak, aby na vnějším povrchu zebra-desky bylo světlo rovnoměrně rozptýleno po celé ploše. Z tohoto důvodu byly provedeny experimenty se 12 typy rozptylových desek ze skla a plastu. Vedle typu desky bylo nutné specifikovat i vzdálenost desek nad LED zdroji, počet rozptylových desek a umístění nad sebou a vzdálenosti mezi LED pásky. Pásky byly v odrazové světelné desce lepeny 50 mm od sebe a pro dokonalý rozptyl bylo nutné použít dvou rozptylových desek. S ohledem na hmotnost desek, které jsou umístěny ve výšce 30 a 70 mm pro zajištění dokonalého rozptylu, byl zvolen materiál Plexiglas truLED. Vnitřek je opatřen nástřikem matné bílé barvy.

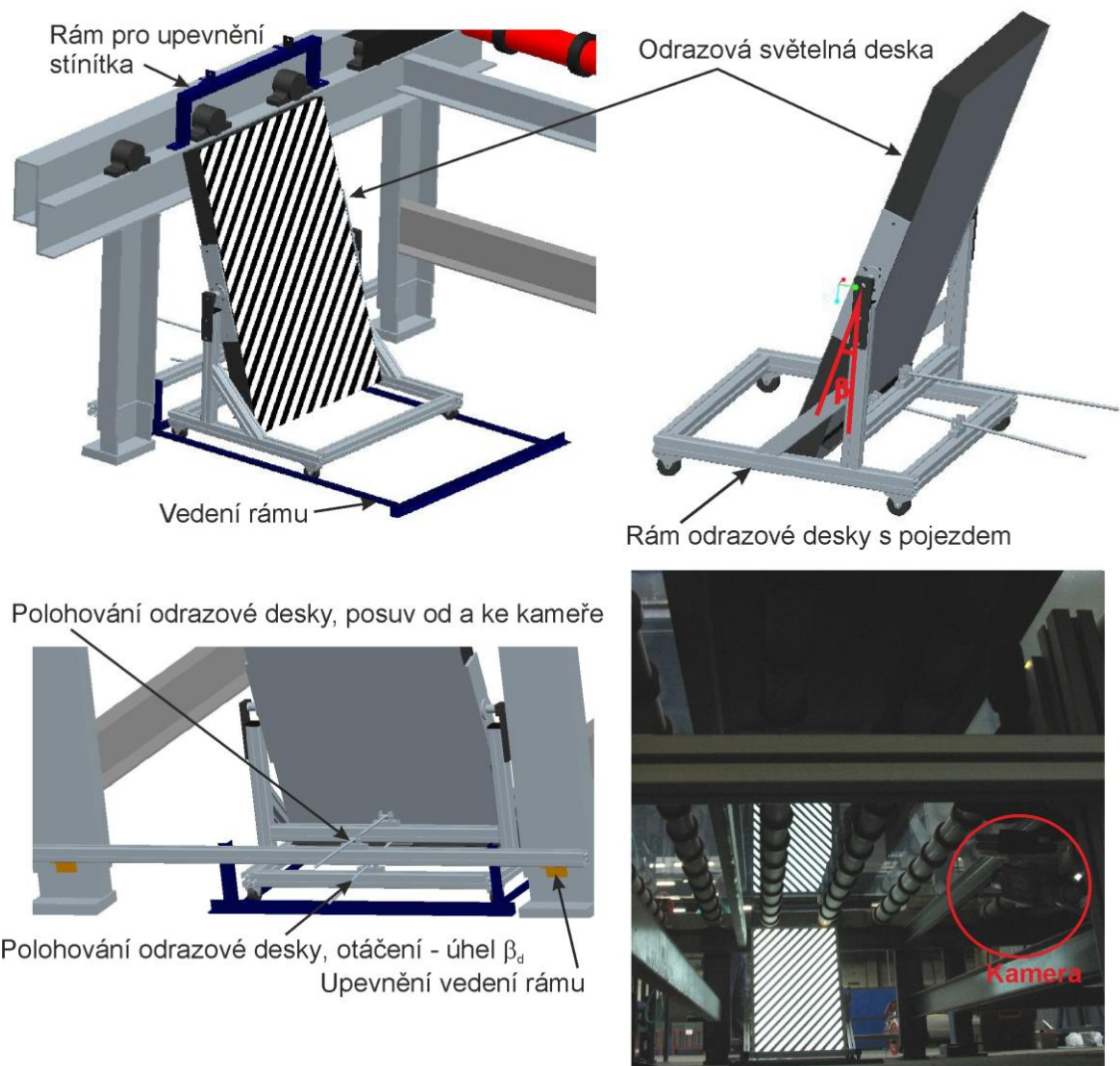
Vzhledem k použitému plastovému materiálu bylo nutné naměřit tepelné podmínky

v uzavřeném prostoru. Z měření v uzavřeném prostoru vyplynulo:

- nad diodami ve výšce 70 mm se ustálí teplota 36 až 39 °C po 30 minutách,
- přímo na diodě se ustálí teplota na 62 až 67 °C po 30 minutách.

Materiál Plexiglas truLED je použitelný do 80 °C, tedy lze ho použít pro navržené uspořádání odrazové světelné desky.

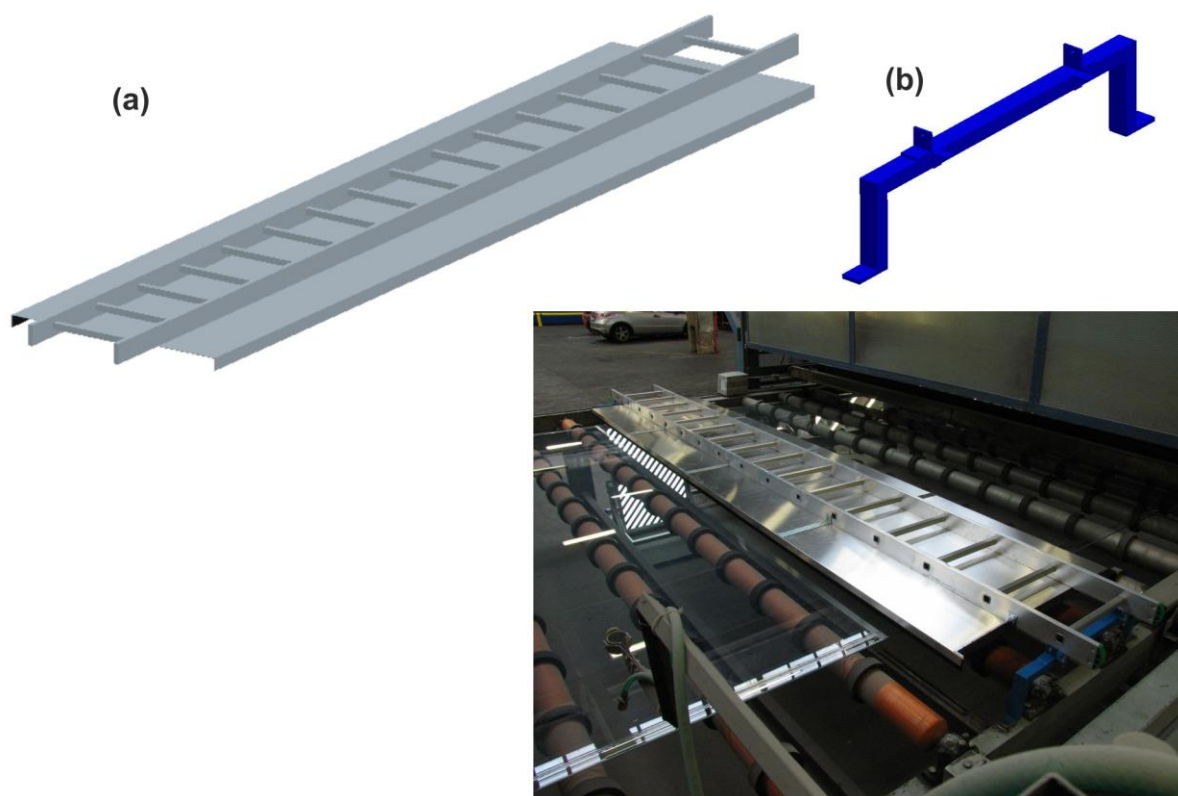
Odrazová deska má vnější rozměr 930 x 630 x 72 mm, Obr. 5.59. Je upevněna otočně na rámu z hliníkových profilů a umožňuje náklon $\beta = 10^\circ$ až 40° (vypočtené nastavení na základě experimentů bylo 20°). Náklon světelné desky je řešen pomocí závitové tyče, na jedné straně připevněné otočně k odrazové desce a na druhé posuvně k rámu desky s aretací pomocí matic. Rám je opatřen kolečky, která se pohybují ve vedení rámu. Je tak umožněn pohyb napříč směru výroby – v ose z, směrem od a ke kameře. Poloha desky je pak fixována pomocí závitové tyče připevněné otočně k rámu a matic vymezujících polohu v posuvném uložení. Vedení rámu je upevněno na hliníkový profil, který je šroubovým spojem přichycen ke dvěma L-profilům přivařeným ke dvěma nohám linky.



Obr. 5.59 Model a snímek odrazové světelné desky v rámu s pojezdem, vedením rámu a upevněním na linku

5.2.5.2 Stínítko pásu skla s rámem

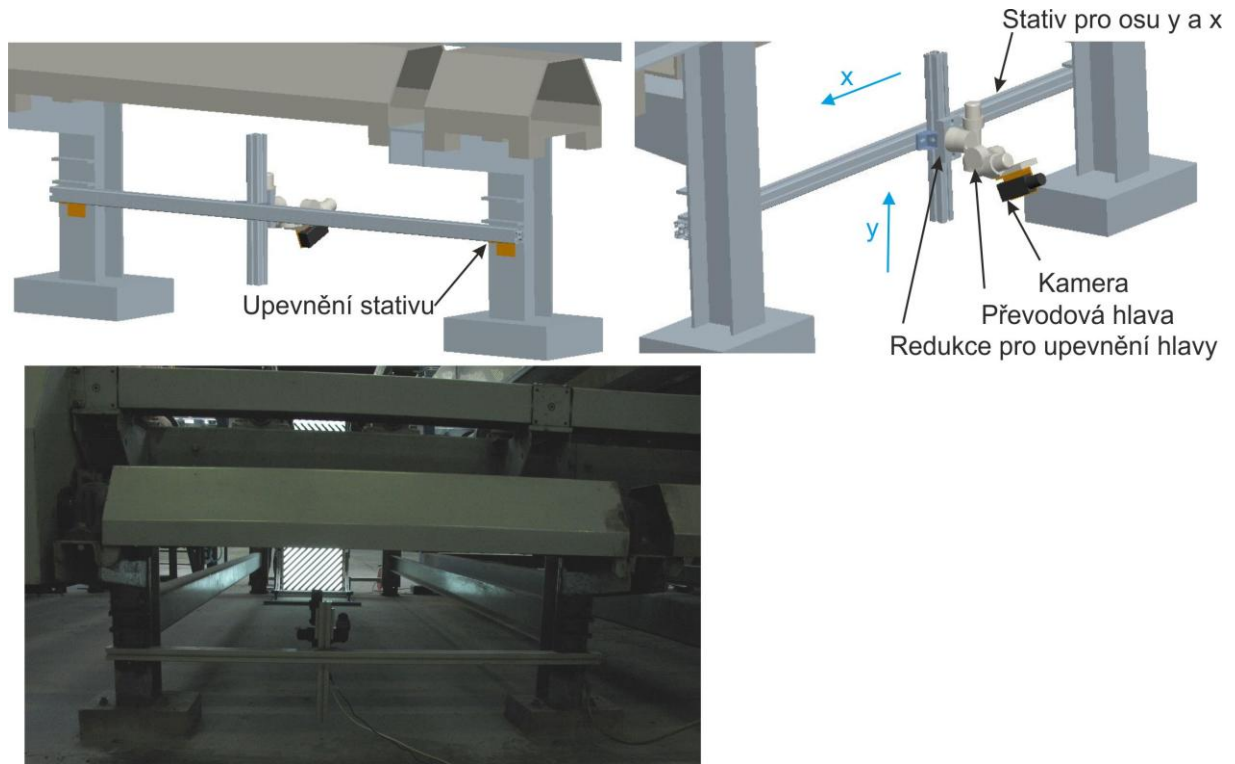
Při návrhu zastínění horní části (zakrytí pozadí snímaného pásu) bylo nutné zohlednit požadavky na snadné odnímání, proto musí být tato část lehká se snadnou manipulací. Základem je rám vyrobený úpravou hliníkového žebříku, který má dostatečně nízkou hmotnost a zároveň požadovanou nosnost s minimálním průhybem, Obr. 5.60 (a). Na rámu je upevněno stínítko pásu, což jsou těsně vedle sebe upevněné dva plechy délky 2 000 mm a šířky 900 mm ohnuté do mělkého U s výškou hran 50 mm. Strana plechů umístěná nad pás je pro minimalizaci odrazu světla prošlého pásem skla opatřena černým samolepícím sametem Velur, jehož povrch dobře pohlcuje světlo a blíží se Lambertovskému povrchu (kap. 3.1.7.1). Rám stínítka je upevněn do rámu přivařeného k lince, Obr. 5.60 (b) a Obr. 5.59. Poloha stínítka nad sklem je nastavována pomocí šroubů v rámu pro upevnění stínítka a rám stínítka je fixován sevřením do čtyř šroubů umístěných z boku rámu pro upevnění stínítka.



Obr. 5.60 Model a snímek stínítka pásu s rámem: (a) rám a stínítko, (b) rám pro upevnění stínítka

5.2.5.3 Stativ kamery

Kamera pro experimentální účely musí být snadno nastavitelná především výškově (osa y) pro stanovení optimální polohy snímání a ve směru výroby (osa x) pro snadné nastavení kamery do požadované polohy. V případě potřeby musí jednoduchým rozšířením umožnit nastavení i v ose z . Kamera je umístěna na tříosé převodové hlavě a je před měřením přesně nastavena v těchto osách. Pro konstrukci byly použity dva hliníkové profily s redukcí na upevnění převodové hlavy, Obr. 5.61.



Obr. 5.61 Model a snímek stativu hlavy a jeho umístění na linku

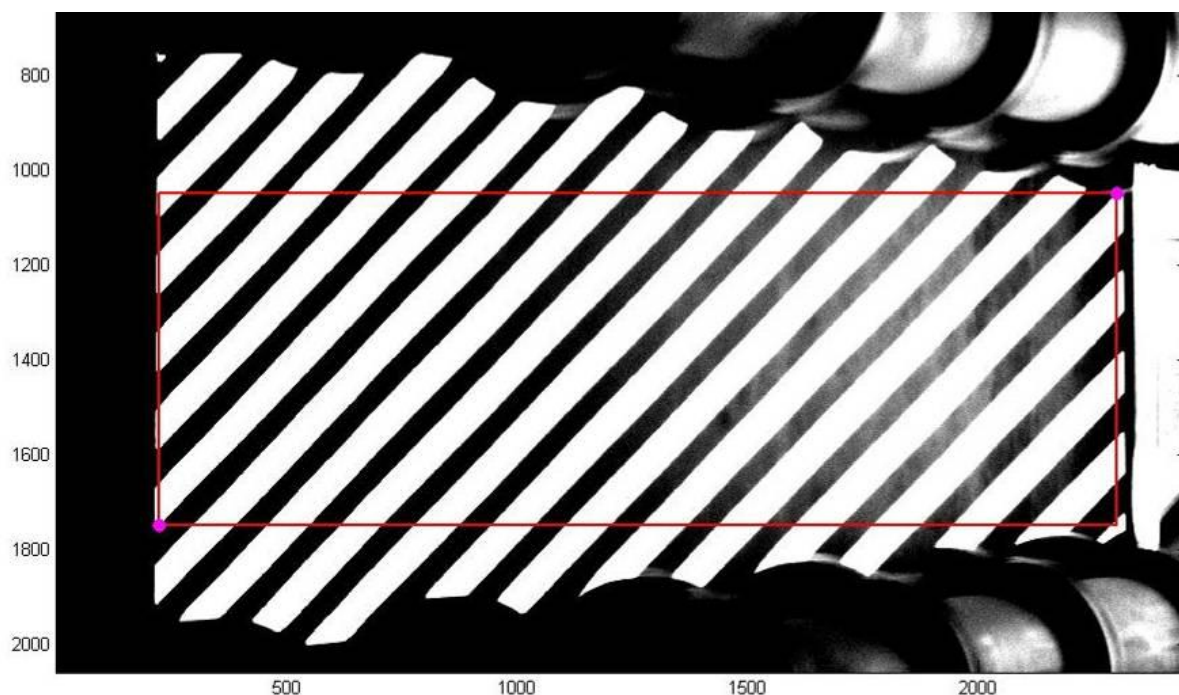
5.2.5.4 Prvotní výsledky z experimentálního měření

Při prvních experimentech byly zkoumány různé objektivy a clony objektivu, které je vhodné stanovit experimentálně s ohledem na komplikované vztahy osvětlení, clony, ohniskové vzdálenosti atd. Porovnání snímků získaných při zhasnuté výrobní hale a při plném osvětlení haly ve dne ukázalo, že vliv okolního světla není pro dané experimentální zařízení v daném upořádání a nastavení kamery pozorovatelný. Při prvních experimentech byla nastavena zebra-deska do polohy pro získání kvalitních snímků s pokrytím dané oblasti pro hodnocení pásu skla, což je zhruba polovina pásu skla.

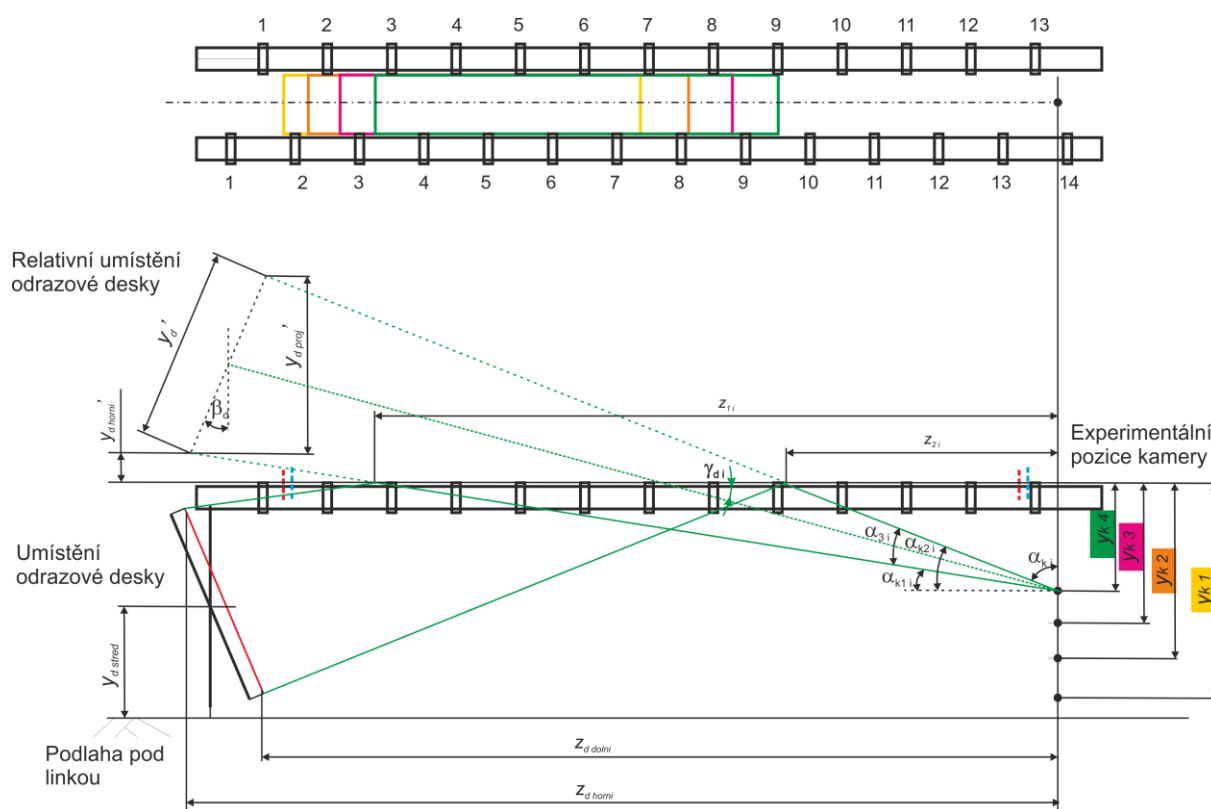
Pro zpracování snímků byl vyvinut softwarový nástroj, v němž jádro výpočtů bylo použito z metodiky off-line. Na snímcích byla specifikovaná snímaná oblast (Obr. 5.62), v níž bylo počítáno 16 parametrů pro 2 prahy (fraktální dimenze, délka, rozsah, směrodatná odchylka, rozdíly od ideální jakosti, suma úhlů křivky,). Byla ověřena funkčnost tohoto nástroje a potvrzena použitelnost pro on-line měření. Váhové koeficienty z off-line metodiky musely být znovu vypočteny, neboť získané snímky mají nižší míru zvlnění (danou především jinými úhly pozorování).

Již zmíněným důležitým kritériem je poloha kamery, v tomto případě umístění v ose y , tedy velikost úhlu mezi sklem a kamerou. Úhel γ_{di} se zvětšuje s umístěním kamery níže pod sklo na lince, Obr. 5.63. Tím se snižuje intenzita optického zvlnění skla, tedy absolutních hodnot získaných parametrů, při použití menšího úhlu mezi sklem a kamerou γ_{di} (což je zřejmé i pouhým okem, Tab. 5.8). Úhel mezi kamerou a sklem γ_{di} je tak veličina, která absolutní hodnoty parametrů značně ovlivňuje. S nižším úhlem γ_{di} bude vyšší absolutní rozdíl mezi získanými parametry. Lze proto odvodit doporučení dát kameru co nejblíže ke

sklu (aby úhel byl co nejmenší). Zároveň objektiv musí mít dostatečně úzký úhel záběru, aby bylo plně využito rozlišení objektivu.



Obr. 5.62 Snímek z prvních experimentů s vyznačenou oblastí hodnocení



Obr. 5.63 Umístění kamery a zebra-desky pod linkou s vyznačením oblastí snímáných v dané poloze kamery

Uvedené parametry se dále budou měnit s použitou clonou na objektivu kamery, intenzitou osvětlení, dobou expozice, zesílením signálu (zisk, gain, kap. 3.1.1), dále nastavením prahů pro převod na binární snímek, atd. Nastavení bude potřeba provést vždy pro dané uspořádání a pro zvolené nastavení spočítat i váhové koeficienty pro přepočet jakosti.

Vliv na měření má dále tzv. šum, který je spojen s vibrací přenesenou na kameru. Při správném upevnění kamery na linku s minimalizací vibrací je projev šumu v absolutních hodnotách relativně malý a stejný pro všechny polohy kamery (jedná se především o tepelný šum způsobený zahříváním snímacího čipu kamery – temný proud, kap. 3.8.2). Projev se více při zvětšujícím se úhlu γ_{di} mezi sklem a kamerou (kamera je usazena nízko na lince), protože absolutní hodnoty zvlnění na snímcích klesají, ale šum se nemění. Lze proto odvodit doporučení dát kameru co nejbližší ke sklu (aby úhel byl co nejmenší).

Pro dané uspořádání je ovšem umístění kamery limitováno požadavkem na zachycení celé poloviny pásu včetně okraje. Vlivem optických závislostí a technických možností umístění zebra-desky co nejbližší ke sklu je při nízkých úhlech nemožné na okraji skla zobrazit odraz zebra-desky. Jako limitní se pro dané uspořádání jeví poloha y_{k2} , Obr. 5.63 a Tab. 5.12.

Prvotním experimentálním provozem byla prokázána schopnost zařízení získávat obrazová data v požadované kvalitě.

Tab. 5.12 Pozice snímaného odrazu zebra-desky z_{1i} , z_{2i} a vzdálenost objektivu od skla y

Měření	z_{2i} [mm]	z_{1i} [mm]	y_{ki} [mm]	y_{ki}
1	1887	3565	1005	y_{k1}
2	1699	3471	820	y_{k2}
3	1509	3359	665	y_{k3}
4	1270	3187	505	y_{k4}

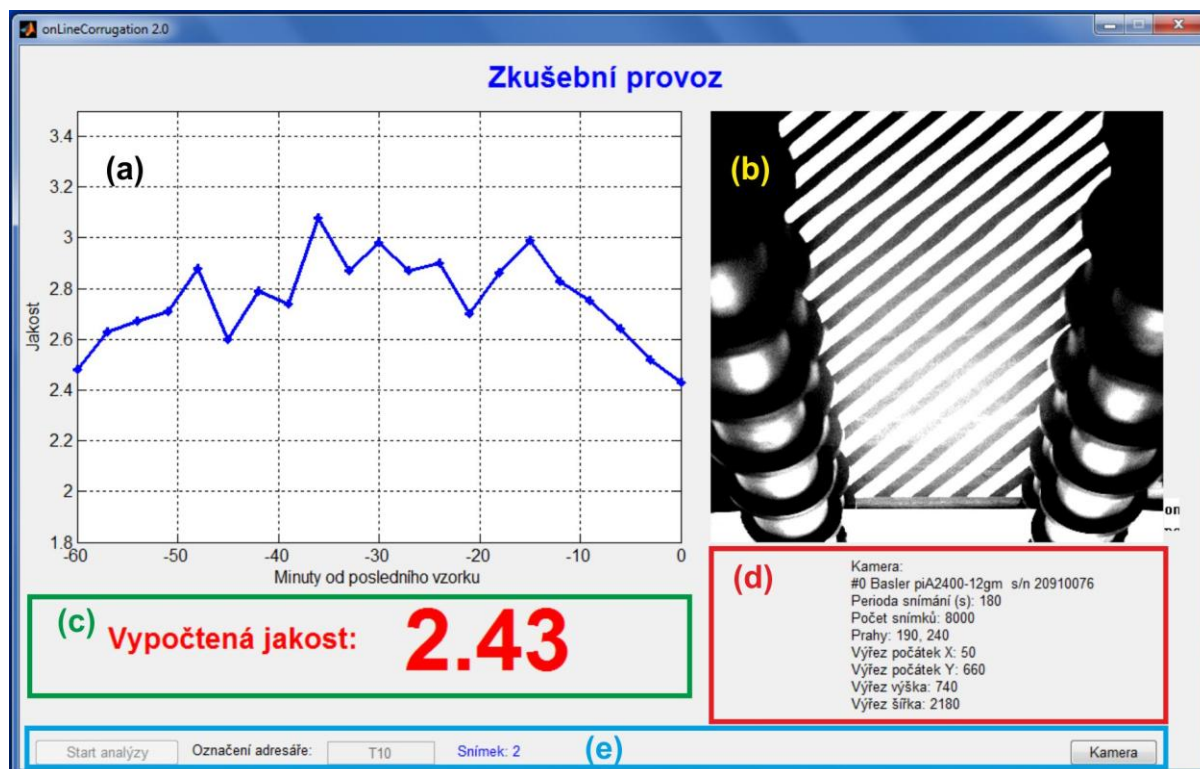
5.2.6 Zkušební provoz on-line zařízení pro zavedení corrugation testu v provozních podmínkách

Zařízení funguje na principu získání samostatných snímků odrazu zebra-desky od spodní strany pásu kontinuálně vyráběného plochého skla. Samostatné snímky byly ve zkušebním provozu ukládány pro další zpracování. Vedle snímků bylo ukládáno i hodnocení snímků, včetně času získání, výsledných parametrů a nastavení hodnocení.

Hodnocení snímků je založeno na stejném principu jako off-line hodnocení corrugation testu. Pro stanovení použitelných křivek rozhraní je třeba zvolit správný práh pro převod na binární snímek. U analyzovaných snímků ze zkušebního provozu byly stanoveny vhodné prahy v rozmezí 150 až 250. Pro analýzu jsou, stejně jako u off-line hodnocení, používány vždy dva prahy tak, aby byly detekovány oba typy zvlnění (primární – velmi zřetelné a sekundární – šedivé, méně zřetelné). Je třeba však zdůraznit, že stanovení prahu je dále

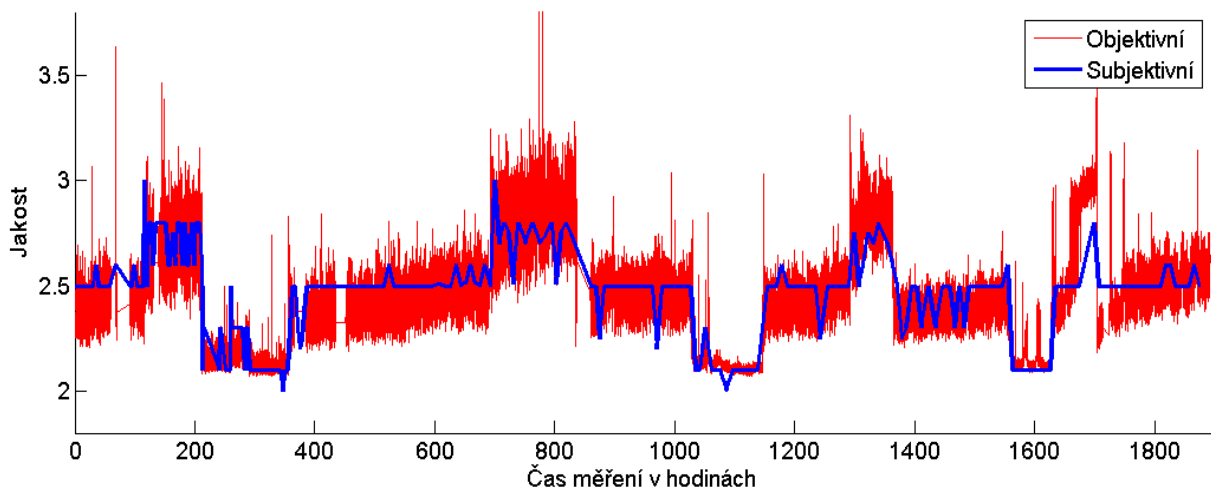
funkcí intenzity záření dopadajícího na senzor, doby expozice, clonového čísla na objektivu, zesílení signálu a dalších nastavení. Proto je třeba vždy nastavit stejné parametry na zařízení, aby byl tento závěr použitelný. Křivky rozhraní jsou následně vyhodnocovány pomocí matematických nástrojů a jsou získány parametry popisující různé vlastnosti křivek. Použité matematické nástroje jsou shodné s off-line řešením. Jak již bylo zmíněno, váhové koeficienty pro přepočítání na používanou škálu jakosti musely být znovu vypočteny na základě počátečních měření konfrontovaných se stanovením jakosti off-line (subjektivně i objektivně).

Souběžně bylo vyvíjeno také grafické rozhraní software, které poskytovalo informace o jakosti on-line na monitoru. Grafické rozhraní programu onLineCorrugation 2.0 se skládá z pěti částí. V levé horní části (Obr. 5.64 a) je zobrazen průběh posledních 20 měření jakosti vyjádřený v minutách. Toto okno by mělo umožnit sledovat trend změn jakosti a je možné změnit jeho rozsah. V pravé horní části je náhled z kamery na aktuálně snímáný proces (Obr. 5.64 b). V levé střední části je zobrazen výsledek poslední analýzy po přepočtu na používanou škálu jakosti (Obr. 5.64 c). V pravé střední části je zobrazeno nastavení kamery (typ kamery, perioda snímání – čas mezi jednotlivými snímky v sekundách, počet snímků – definuje, kolik snímků se provede, než se snímání ukončí, stanovené prahy a pozice výřezu – části snímku, která je analyzovaná, Obr. 5.64 d). V dolní části programu jsou tlačítka pro spuštění programu, označení adresáře pro ukládání snímků a měření, tlačítko pro nastavení kamery (Obr. 5.64 e).



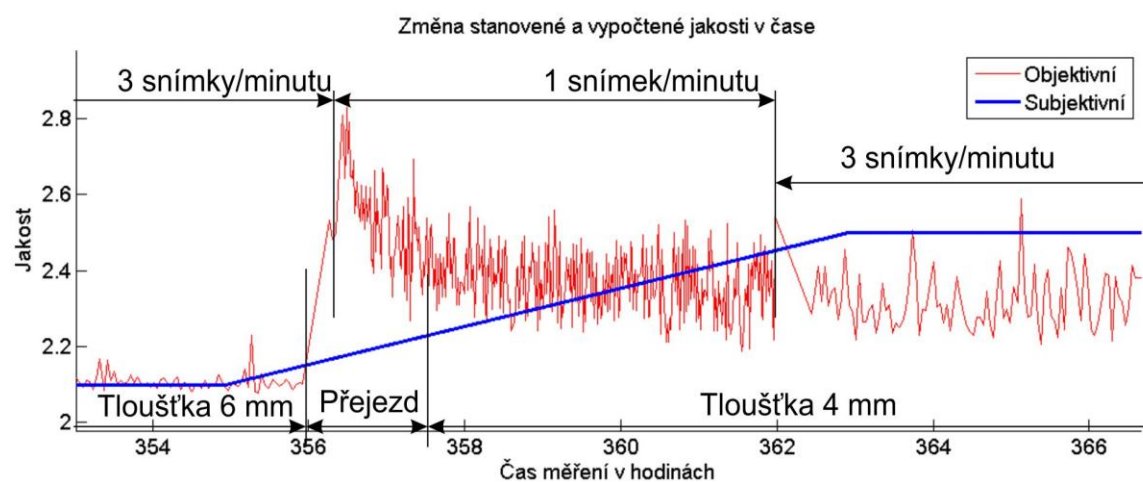
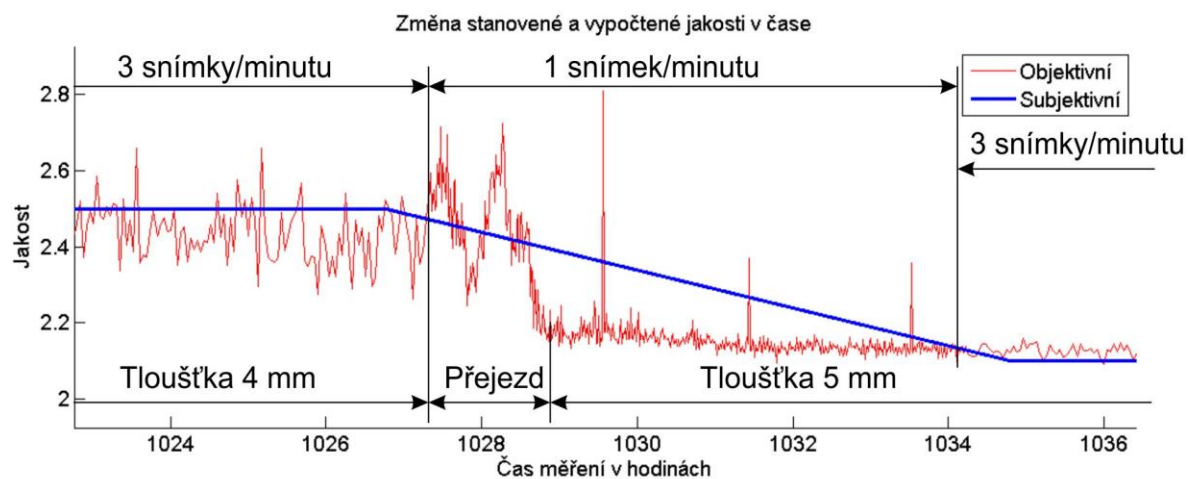
Obr. 5.64 Software onLineCorrugation 2.0, (a) průběh posledních 20 měření jakosti, (b) náhled z kamery, (c) výsledek hodnocení jakosti, (d) nastavení kamery a výřezu, (e) tlačítka pro spuštění programu, označení adresáře pro ukládání snímků a měření, tlačítko pro nastavení kamery

Zkušební provoz trval 2 měsíce a 18 dní (79 dní). Bylo provedeno 45.239 měření, která byla nasnímana v rozsahu 1.892 hodin a s frekvencí: snímek 1× za 3 minuty a 1× za 1 minutu. Snímání po 1 minutě bylo voleno pro přejezdy, kdy docházelo k výrazným změnám v jakosti, a 3 minuty byly voleny pro stabilizovaný provoz). 349 měření bylo vyřazeno z důvodu nepřítomnosti skla na dopravníku a tedy nulových hodnot parametrů. Celkově získaná data měla objem 331 GB při rozdělení na 38 samostatných měření. Off-line měření bylo prováděno souběžně se zvýšenou četností, a to opět s ohledem na změnu jakosti. Propojením dat získaných z off-line měření a z měření on-line bylo možné získat závislost změřených parametrů on-line na jakosti hodnocené off-line (Obr. 5.65).

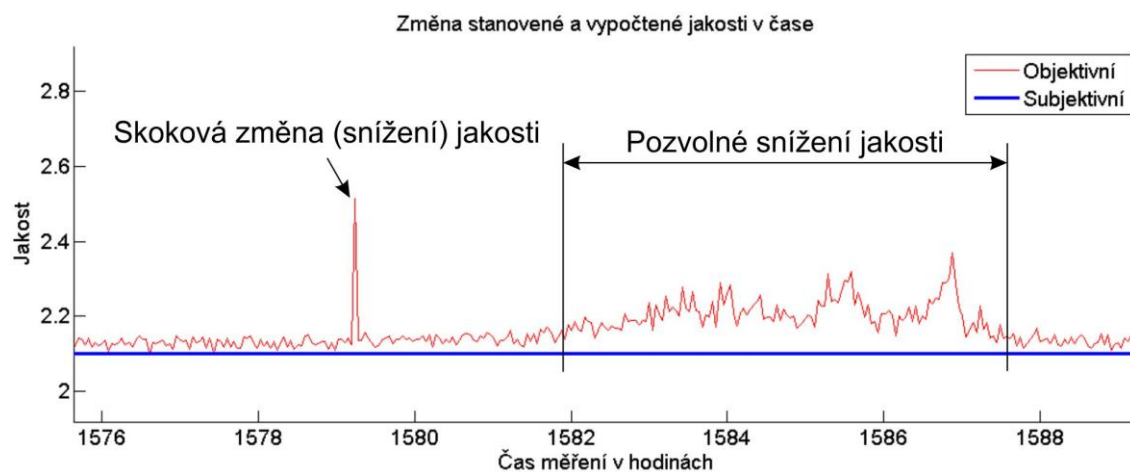


Obr. 5.65 Změna stanovené (subjektivní) a vypočtené (objektivní) jakosti v čase

Výsledky ukazují, že jednotlivé parametry oscilují v určitém rozsahu a často v periodách, které se v závislosti na čase mění. Jakost se tedy mění v průběhu několika minut až hodin až v rozsahu 0,4 jakosti. Výkyvy jakosti jsou pak vyšší pro tenčí skla (tloušťky 3 a 4 mm) než pro sklo větších tloušťek 5 až 8 mm). Příklad je uveden na Obr. 5.66 jak pro změnu tloušťky ze 4 mm na 5 mm, tak pro opačnou změnu z tloušťky 6 mm na 4 mm. Lze usuzovat na souhrn několika činitelů, které přímo jakost měřenou corrugation testem ovlivňují. Z analýz dat také vyplývá možnost sledování skokových a pozvolnějších změn, které nejsou odhaleny off-line měřením. Příklad je uveden na Obr. 5.67.



Obr. 5.66 Změna tloušťky skla v čase (přejezdy) a vyšší oscilace jakosti v pro skla nižší tloušťky



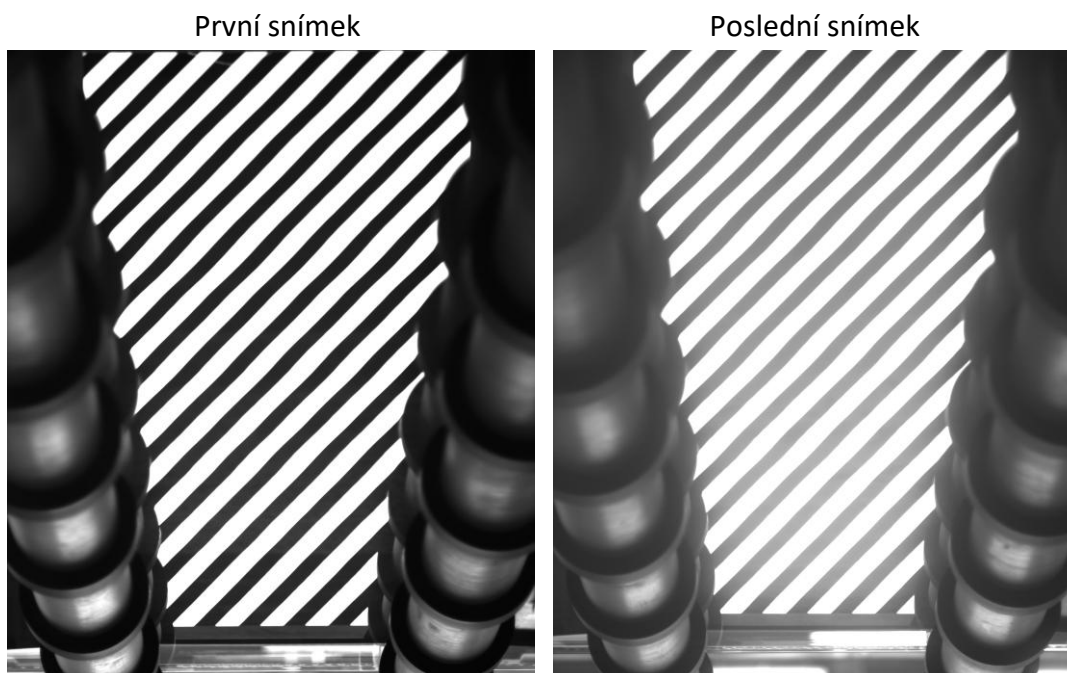
Obr. 5.67 Skoková a pozvolnější změna jakosti v čase

5.2.7 Vyhodnocení funkčnosti zkušebního zařízení pro zavedení on-line corrugation testu v provozních podmínkách

Prvním zásadním problémem praktického nasazení byla zvýšená teplota v okolí linky, což vedlo k přehřívání vyhodnocovací jednotky (počítače). Po plánované rekonstrukci linky bylo zařízení instalováno pro zkušební provoz a bylo využito připraveného zázemí, kdy vyhodnocovací jednotka byla umístěna v klimatizované místnosti a byla s linkou spojena datovými kabely pro připojení kamer.

Součástí zkušebního provozu bylo také otestování vlivu okolního prostředí na funkčnost zařízení. Po celou dobu nebyla záměrně prováděna údržba.

Očekávaným a detekovaným problémem je zaprašování kamery a světelné zebra-desky, které názorně ilustruje Obr. 5.68. Na obrázku je uveden první a poslední snímek z celého zkušebního provozu. Důsledkem evidentně nižšího kontrastu na posledním snímku je prach ukládající se jak na světelné zebra-desce, tak na objektivu kamery. K zaprašování obou částí dochází převážně lineárně. Zaprašování lze detekovat mnoha způsoby (sledováním průměrného jasu celého snímku, sledováním změn jasu pro tyto účely instalovaného terčíku, vyhodnocování parametrů získaných křivek rozhraní, které mohou změny detekovat atd.). Jak již bylo dříve zmíněno, na detekci křivek rozhraní odrazu zebra-desky má významný vliv zvolený práh. Již z dřívějšího výzkumu jsou použitelné prahy od hodnoty 150. Tato hodnota prahu byla použita pro stanovení limitního času, od kterého dochází k významnému vlivu zaprašování. Z analýzy vyplývá limitní hodnota 837 hodin, což je 34 dnů a 21 hodin. Vzhledem k použití vyšších prahů (pro software onLineCorrugation 2.0 prahy 190 a 240), které nejsou tak citlivé na zaprašování, je možné považovat tento výsledek s dostatečnou rezervou za limitu. Čištění kamery a světelné zebra-desky lze u tohoto zařízení doporučit vždy po 4 týdnech.



Obr. 5.68 Zobrazení prvního a posledního snímku se zřejmým snížením kvality snímku z důvodu zaprašování zařízení

Dalším problémem k řešení při průmyslovém nasazení je pevná pozice zařízení při měření. Změna pozice (i nepatrně) kamery nebo zebra-desky může vést ke změnám ve vyhodnocování. Například nutnost restartu kamery přerušením napájení přímo na kameře vedla k mírné změně její pozice. Dále docházelo k mírným posunům obrazu pravděpodobně vlivem vibrací na zařízení. Posun kamery vlivem vibrací je relativně malý, lze ho správným upevněním kamery omezit a vliv řádu několika měsíců zohlednit ve zpracování snímku. Při průmyslovém nasazení je nutné především minimalizovat možný vliv obsluhy (např. při řešení technických problémů se zařízením, údržbě) a vliv okolí (zásah do zařízení nepověřenou osobou, poškrábání zebra-desky od rozbitého skla atd.)

Přesto lze konstatovat, že zařízení provozované v rámci zkušebního provozu dokáže získat relevantní data o jakosti poloviny pásu vyráběného plochého skla.

5.2.8 Návrh provozního zařízení pro on-line corrugation test in-line

Na základě provedených experimentů a zkušebního provozu byly specifikovány podmínky zanesené do návrhu zařízení:

- využít ověřené metodiky v rámci zkušebního provozu pro polovinu pásu,
- zařízení s dostatečnou robustností a odolností proti vnějším vlivům,
- snadná údržba (čištění zebra-desky, čištění kamery),
- uchycení zařízení s minimalizací vibrací přenesených na zařízení,
- snadné odstavení zařízení při neočekávaných událostech a umožnění bezproblémového náběhu výroby při přerušení pásu skla,
- minimalizace (lépe vyloučení) mechanické změny zařízení (i automatické) při změně sortimentu výroby (tloušťka skla),
- odrazová světelná deska s možností zvýšení intenzity osvětlení,
- správné umístění triggerovacího zařízení, umožňující přesné měření rychlosti pásu,
- přesná koordinace obou kamer s návazností na výpočet jakosti a spolupráce kamer,
- přesná detekce okraje pásu na snímcích s koordinací výřezu pro hodnocení jakosti,
- srozumitelné grafické rozhraní on-line programu pro hodnocení jakosti,
- schopnost ukládání a exportu získaných výsledků hodnocení,
- případná komunikace s nadřazeným systémem.

Na základě konstrukce experimentálního zařízení pro on-line měření, které bylo podrobeno provoznímu testování, byl navržen prototyp pro provozní nasazení. Je předpoklad, že prototyp bude trvale umístěn na lince, proto bude oproti experimentálnímu zařízení rozšířen o konstrukční úpravy, které zvýší dlouhodobou ochranu kamer, umožňující údržbu částí zařízení (čištění od prachu) a zdvihem stínítka zlepší ochranu zařízení v případech nestandardních situací na lince. Prototyp bude řešen zdvojením experimentálního systému, tedy bude sestaven ze dvou odrazových světelných desek, dvou kamer a dvou stínících

desek. Umístění odrazových světelných desek a kamer vůči sobě je provedeno shodně, ale u druhého měření zrcadlově k prvnímu. Provozní zařízení se skládá (podobně jako experimentální) ze třech hlavních částí, Obr. 5.69:

- 1) Dvě odrazové světelné zebra-desky a rámem s vedením připevněným k lince (a), u odrazových desek je umožněn pohyb a náklon pro zajištění dostupnosti čela desky pro čistění.
- 2) Dvě stínítka pásu skla s nosným rámem a rámem pro uchycení k lince (b), umožňují snadné nadzvednutí z pracovní polohy o 60 mm, což by mělo postačovat pro zamezení jakékoliv kolize při náběhu linky a při nestandardních situacích na lince.
- 3) Dva stativy kamer s převodovou hlavou připevněné k rámu linky (c) a kryty kamer pro zamezení vniknutí prachu a poškození kamery při kolizních situacích.

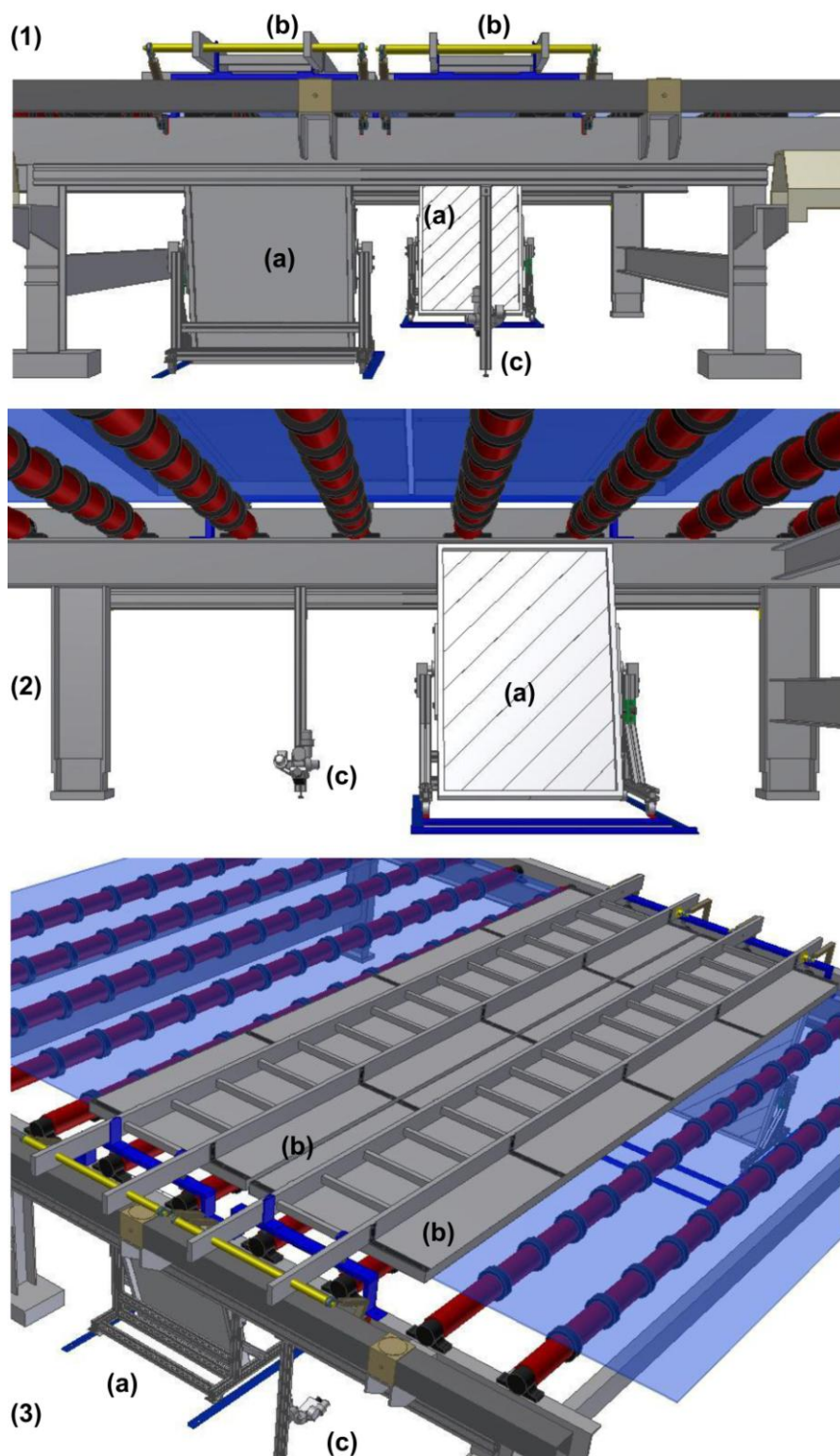
Konstrukční řešení umístění **odrazové světelné desky** a její výchozí nastavení je provedeno podobným způsobem jako u experimentálního zařízení ve formě vozíku, Obr. 5.70. Vzhledem k nutnosti pravidelné údržby v podobě mytí povrchu je řešeno vyklopení odrazové desky a vyjetí vozíku se sklopenou deskou z prostoru pod linkou. Vyklopení a zpětné vrácení desky do výchozí měřicí polohy je umožněno aretačním kolíkem umístěným v drážkovém segmentu na boční straně odrazové desky. Vyklopení je možné pouze v případě vyjetí vozíku vpřed o danou vzdálenost. Pohyb vozíku je realizován na kolečkách v dráze vymezené kolejnicemi osazenými prizmatickými zářezy, které vymezují měřicí polohu vozíčku pod linkou. Software bude řešen tak, aby malá změna v poloze zebra-desky nevedla k jiným výsledkům.

Konstrukční řešení **stínící desky** je podobné experimentálnímu. Stínící deska je uložena na svařovaném rámu a vzhledem k prostorovým dispozicím je zdvih řešen paralelogramem s tvarovanými vahadly, Obr. 5.71. Zdvih bude možné uskutečnit ručně, a to z obou stran linky tahem, respektive tlakem. Provozní poloha stínítka je minimálně 20 mm nad sklem, bezpečnostní zdvih se předpokládá +60 mm, tj. bezpečnostní poloha stínítka je minimálně 80 mm nad sklem.

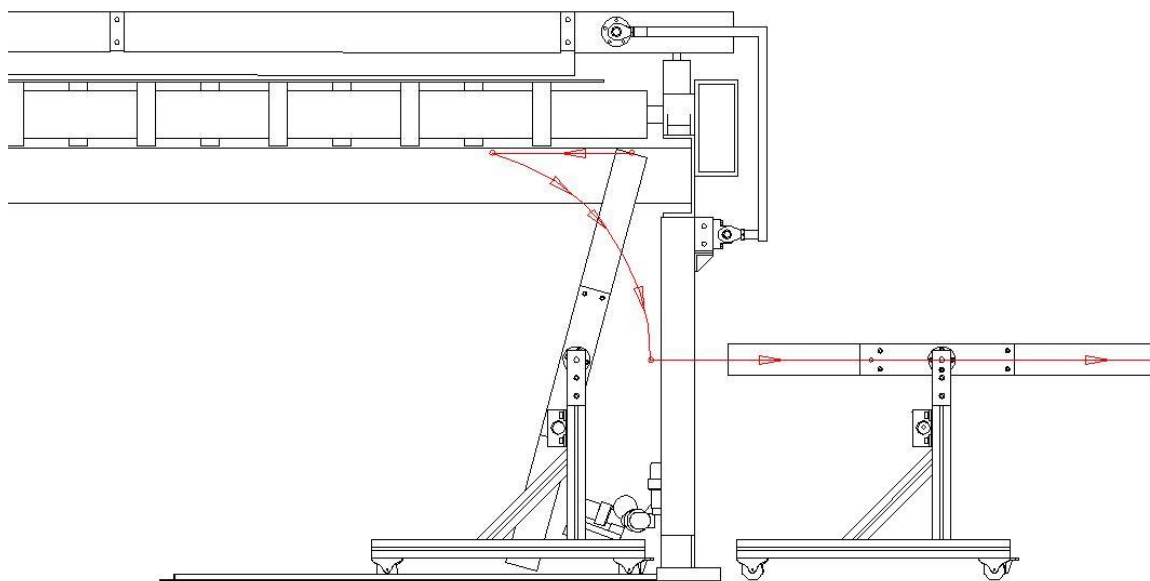
Kamery jsou umístěny v krytu a uloženy na dvou extrudovaných profilech na stativové hlavě. Podélný profil je umístěn v takové výšce, aby nebránil vyjetí vozíku s osvětlovací deskou z prostoru pod linkou. Kamera je umístěna do krytu, který zabraňuje vniknutí prachu a poškození kamery. Skla krytů je také třeba pravidelně čistit.

Kamery jsou propojeny s **počítačem** přes rozhraní GigE. Počítač bude umístěn v klimatizované místnosti pro laser. Zdroj proudu a komunikační kabely jsou vedeny od počítače ke kamerám patrem pod linkou. Na počítači je instalován software pro komunikaci kamer, software pro zpracování a vyhodnocení snímků (další verze onLineCorrugation). Systém počítá s možností vizuální kontroly aktuálního hodnocení corrugation testu na obrazovce umístěné v okně místnosti laseru.

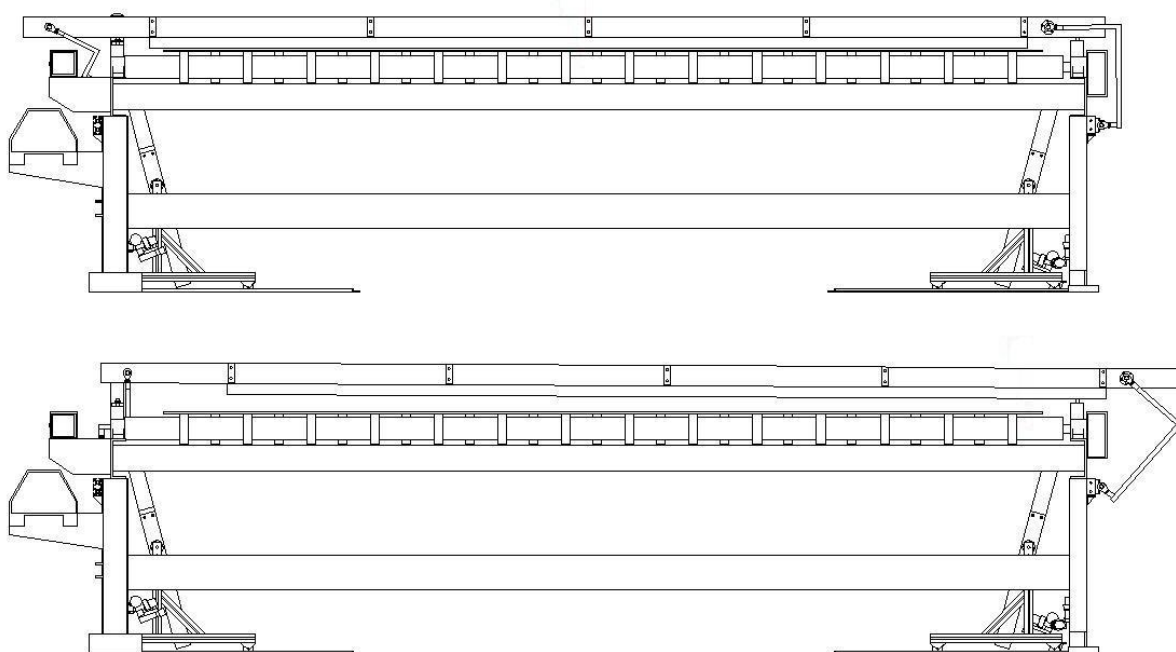
Pro umístění zařízení je nutná příprava prostoru na lince. Válce v místě snímání musí být načerněny, k lince je nutné z obou stran přivést zdroj elektrického proudu a připravit propojení kamer s PC pomocí zodolněných GigE kabelů.



Obr. 5.69 Návrh prototypového zařízení pro on-line detekci (3D zobrazení s perspektivou), (a) boční zebra-deska s rámem a vedením připevněným k lince, (b) stínítka pásu skla s nosným rámem a rámem pro uchycení k lince, (c) stativy kamer s převodovou hlavou připevněný k rámu

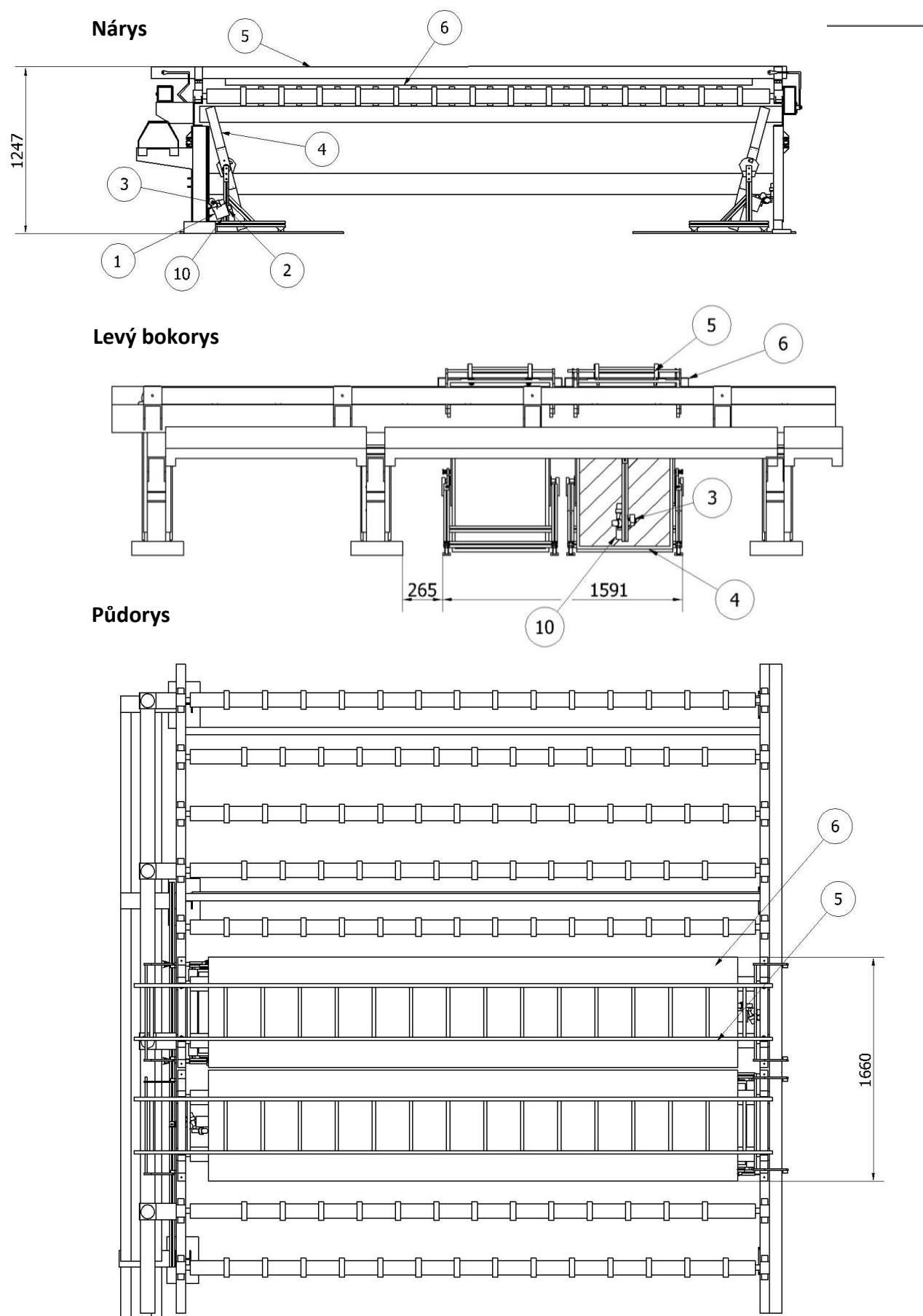


Obr. 5.70 Schéma manipulace s odrazovou světelnou deskou při čištění



Obr. 5.71 Polohy stínítka pásu v pracovní a odstavné poloze

Sestava celého zařízení je na Obr. 5.72 a názvy jednotlivých částí jsou uvedeny v Tab. 5.13.



Obr. 5.72 Provozní zařízení pro on-line detekci v pohledech, kóty korespondují s čísly v Tab. 5.13

Tab. 5.13 Popis částí provozního prototypového zařízení on-line corrugation testu

Číslo	Položka	Počet kusů
1	Basler piA2400-12gm 2 448 x 2 050 17fps C-mount CCD 2/3	2
2	Objektiv f = 35 mm	2
3	Hlava Velbon	2
4	Světelný panel – zebra-deska a zdroj	2
5	Žebřík	2
6	Hliníkový plech	4
7	Profily Mytec	1
8	Spojovací prvky	1
9	Samolepící Velur	3
10	Kryt kamer	2
11	Prvky pro pohyb desek a stínítka + kovové profily konstrukce	1
12	Interface, zdroj kamery	2
13	Komunikace kamer, stíněný, z odolného GigE kabel	40 m
14	Průmyslový počítač a 2x monitor	1
15	Software pro komunikaci kamer s počítačem	1
16	Elektroinstalace	1

5.2.9 Závěr kapitoly

Kapitola potvrzuje potenciál metody analýzy křivek rozhraní pro další oblasti praktického využití. V první fázi byla prováděna objektivizace corrugation testu, který je realizován off-line. Bylo nutné vyvinout metodiku, která zaručí rozdělení do tříd jakosti, které jsou běžně používány pro subjektivní hodnocení. Metodika opět používá fraktální dimenze spolu s dalšími nástroji statistiky. Výsledné hodnoty vypočtených parametrů jsou následně přepočteny na třídu kvality. Výsledky z dlouhodobého provozu ukazují dobrou shodu a dokládají vyšší míru variability objektivních výsledků v krátkém čase (několika desítek minut), než je u subjektivního hodnocení.

Následný vývoj on-line metodiky měl za cíl přenést off-line metodiku přímo na linku. V tomto případě bylo nutné respektovat provozní a zástavbové podmínky zařízení. Podrobně byl studován vliv změny rozlišení (měřítko) se změnou vzdálenosti odraženého motivu na pásu skla. Byly stanoveny podmínky pro zajištění minimálně stejných nebo lepších podmínek než u off-line řešení. Následoval návrh a realizace experimentálního on-line řešení a po více než 79 dnech zkušebního provozu následovalo vyhodnocení a návrh prototypu provozního zařízení. V této kapitole je velmi akcentován správný návrh konstrukce zařízení. Konstrukce vychází ze základního výzkumu a vede přes následný vývoj k experimentálnímu ověření až po návrh konstrukce zařízení pro průmyslové nasazení.

Celkově je možné přínosy on-line hodnocení corrugation testu shrnout do několika bodů:

- okamžitá kontrola jakosti v podstatně kratších časových intervalech než u off-line kontroly (2 minuty a méně pro celou šíři pásu), je možné sledovat trendy ve vývoji jakosti v řádech desítek minut, skokové a pozvolné změny, které nejsou odhaleny off-line měřením,
- možnost včas detekovat nízkou jakost s možností ji okamžitě vyloučit (při napojení na řídicí systém linky), přímé snížení zmetkovitosti, jedná se o úsporu nákladů,
- možnost označovat danou jakost skla průběžně (především ve vztahu k zákazníkům),
- detekce příčin zhoršení jakosti – při dlouhodobém sledování jakosti z on-line corrugation testu bude možno porovnáním s dalšími daty z linky získat vazby mezi jakostí a měřenými veličinami na lince, měření můžou přinést zajímavé informace o dynamice změny corrugation testu,
- test lze rozšířit o možnost detekce okraje pásu a jeho bortu (bort je důsledkem tvarovacími rolnami, kap. 6.6.1).

Pro off-line a on-line hodnocení byl vyvinut autorem práce software v prostředí Matlab.

5.3 Hodnocení povrchové 2D struktury

Hodnocení povrchové struktury je možné provádět opět pomocí souboru nástrojů, které využívají jak statistiky, odhadu fraktální dimenze, Fourierovy transformace a dalších. Cílem výzkumu bylo objektivizovat hodnocení povrchových 2D struktur a nalézt nástroje pro automatické vyhodnocení charakteru povrchových struktur. V úvodu je nutné upozornit na základní problém, který umožňuje ve svém důsledku porovnání pouze vzorků získaných za stejných podmínek snímání. Tak jak bylo uvedeno v kap. 5.1.4, výsledek analýz je významně závislý na parametrech snímače, na parametrech snímačem detekované energie dopadající a odrážející se od povrchu vzorku a parametrech snímaného povrchu. Zajištění stejných podmínek pro získání obrazu k následné analýze povrchové struktury nezávisle na zařízení není možné. Metodiku je tak vhodné použít pro kvantitativní porovnání dané sady vzorků snímaných v jedné sérii experimentu. Metodika je zde proto jen krátce přiblížena a popsane příklady použití metodiky jsou zde jen krátce zmíněny. Důvodem je také, že zatím žádná z potenciálních aplikací nevedla k uplatnění jak pro vyhodnocení široké škály experimentů (jako popis a hodnocení korozního napadení kovů a slitin, kap. 5.1), tak v průmyslové praxi (jako kvantifikace jakosti plochého skla, kap. 5.2). Neméně důležitá je i šíře této problematiky řešené autorem habilitační práce, která by značně rozšiřovala rozsah práce.

Je také třeba zdůraznit, že aplikace fraktální geometrie je omezena na strukturované snímky, případně objekty a její využití vyžaduje dostatečné znalosti. V opačném případě je výsledek velmi zavádějící.

5.3.1 Princip metodiky

Základy metodiky jsou podobné dříve uvedeným principům pro analýzu rozhraní (kap. 5.1.1 a 5.2.2) a vychází z obecně definovaných pod-procesů v kap. 4:

- 1) Příprava vzorku tak, aby se dala snímat analyzovaná struktura.
- 2) Snímání vzorku kamerou/fotoaparátem pro elektromagnetické vlnění anebo na elektronovém mikroskopu (získání obrazových dat).
- 3) Interpretace obrazových dat:
 - a) Softwarové zpracování datových obrazů (ořezání datového obrazu a případně přepočítání na konstantní kontrast a jas, softwarová filtrace a další úpravy).
 - b) Analýza datového obrazu a získání objektivních parametrů o struktuře.
- 4) Vyhodnocení/zpracování informací a případné posouzení vztahu mezi strukturou a fyzikální podstatou jejího vzniku.

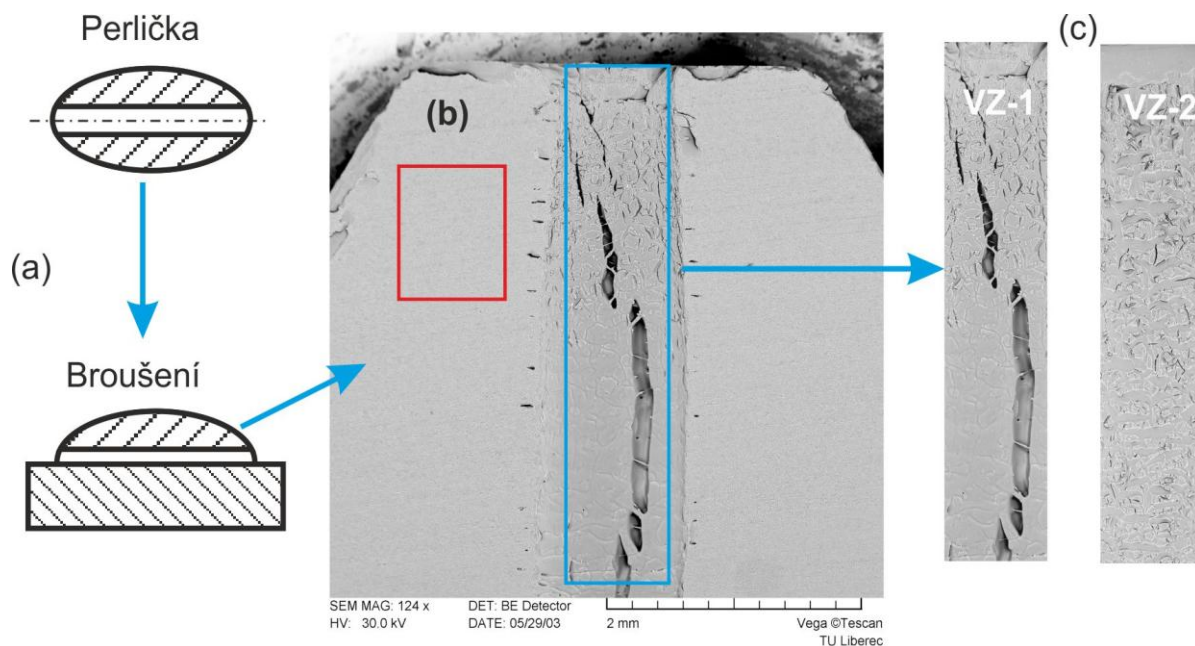
Výsledky analýz 2D snímků lze použít pro určení shody s požadovanou kvalitou a zařazení do tříd jakosti, případně lze i zvážit možnost on-line kontroly povrchu či struktury polotovaru nebo konečného výrobku. Pro tuto analýzu byla užita mřížková metoda, kap. 4.3.2. Dále bylo použito výpočtu procentuálního zastoupení poruch v obraze, počtu sousedních pixelů stejné velikosti pro detekci prasklin, statistického popisu histogramu (kap. 5.3.2) a popisu grafů ve spektrální oblasti po Fourierově 2D transformaci (kap. 5.3.3).

Kvantifikace by obecně měla být jednoduchá, rychlá a výsledek srozumitelně vyjádřen. K přesnému a jasnému definování charakteru povrchu je nutné zvolit nejcitlivější a zároveň nejrobustnější analýzy a vhodně nastavit jejich parametry. Jako nejvhodnější se jeví modulární přístup, kdy pomocí několika analýz (modulů) je vyhodnocena povrchová struktura objektu. Jednotlivá hodnocení lze pak shrnout do jednoho komplexního hodnocení, případně do tříd jakosti pomocí experimentálně daných váhových koeficientů.

5.3.2 Příklad aplikace: hodnocení jakosti povrchu dírký skleněné perličky

V rámci výzkumu byla metodika odzkoušena pro popis kvality povrchů sklářských výrobků po tvarování, přesněji pro popis kvality dírek v bižuterních výrobcích, které jsou vyráběny tzv. pícháním do ještě teplého, a tedy tvárného, polotovaru jehlou. Vytváří se tak dírka, která v konečném výrobku slouží pro navlečení. Vady dírek se projevují především mléčným zakalením dírký, které je dáno rozpraskáním povrchu, které může mít hrubší nebo jemnější strukturu. Kontrola kvality povrchu dírek je dosud prováděna subjektivně, což je nespolehlivé. Tato problematika již byla zmíněna v disertační práci [1] a také v monografii autora [2], proto je zde metodika uvedena jen krátce.

V 1. kroku je vzorek – perlička rovnoměrně zbroušen na $1/3$ průměru dírky, aby se odhalila dírka a minimalizoval se vliv stínu, Obr. 5.73 (a). Následně ve druhém kroku byla na elektronovém mikroskopu pořízena obrazová data dírky, Obr. 5.73 (b) (snímky jsou velikosti $2\,048 \times 2\,240$ pixelů) a dále v kroku 3 zpracovávány v šedé škále v datové hloubce 8 bitů ve formátu BMP. Na snímku byla specifikovaná oblast zájmu (okno), která byla následně analyzována.



Obr. 5.73 Získání snímků povrchu dírek, (a) broušení perličky, (b) výběr okna snímku a okna brusu, (c) analyzovaná oblast vzorku VZ-1, VZ-2, [1]

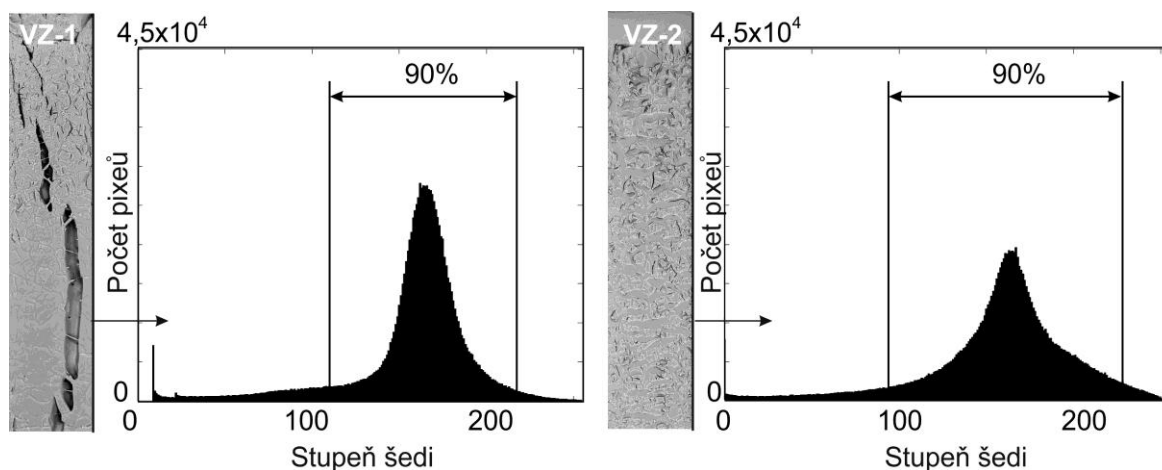
Zásadní problém v druhém kroku je zajištění konstantního kontrastu a jasu. Snímky mají rozdílnou průměrnou hodnotu pixelů, což se projevuje jako celkově tmavší nebo světlejší snímek. To je ovlivněno dobou expozice a výškou vzorku (která byla pro jednotlivé perličky rozdílná).

Ve 3. kroku byla proto provedena korekce na stejný jas pomocí tzv. korekce na brus. Vybraná část brusu (červené okno na Obr. 5.73, b) definuje průměrný jas pro celý snímek (je vypočtena průměrná hodnota z těchto pixelů v okně). Průměrný jas snímku je odečten od zvolené hodnoty jasu a pro celý snímek je jas upraven (představuje to přičtení/odečtení vypočtené celočíselné hodnoty ke každému pixelu obrázku). Tímto postupem není průměrný jas snímku ovlivněn vadami dírky. Na druhou stranu musí být zajištěny stejné podmínky vzniku testovaného povrchu (stejně podmínky broušení, především hrubost brusu).

Oblast zájmu pro analýzu povrchové struktury dírky (označené okno modře v Obr. 5.73, b) byla pro celý experiment definovaná ve stejné šířce 374 pixelů (tedy 0,8 mm), délka se měnila od 1 905 do 2 997 pixelů (4 mm až 6,4 mm). To odpovídá doporučenému limitu 40 % v rozdílu velikosti nejmenšího snímku oproti největšímu [1, 2].

Pro zmíněnou problematiku proto byly zkoušeny jen některé metody (jak statistické, tak odhadu fraktální dimenze) a vybrány ty, které spolehlivě kvantifikují složitosti snímků.

Jedna z analýz, kterou lze použít i u upravených snímků na stejný jas, je založena na **ořezání histogramu na úrovni 5 %**. Analýza je založena na výpočtu jediného charakteristického čísla, což je výpočet šíře 90 % všech hodnot histogramu od průměrné hodnoty obrázku (Obr. 5.74). Šíře vlastně popisuje, v jak širokém intervalu odstínů šedi leží 90 % všech pixelů matice digitálního obrazu.



Obr. 5.74 Snímky vzorků VZ-1 a VZ-2 v šedé škále (vlevo) a jejich histogramy s naznačením šíře 90% všech hodnot histogramu od průměrné hodnoty obrázku, [1]

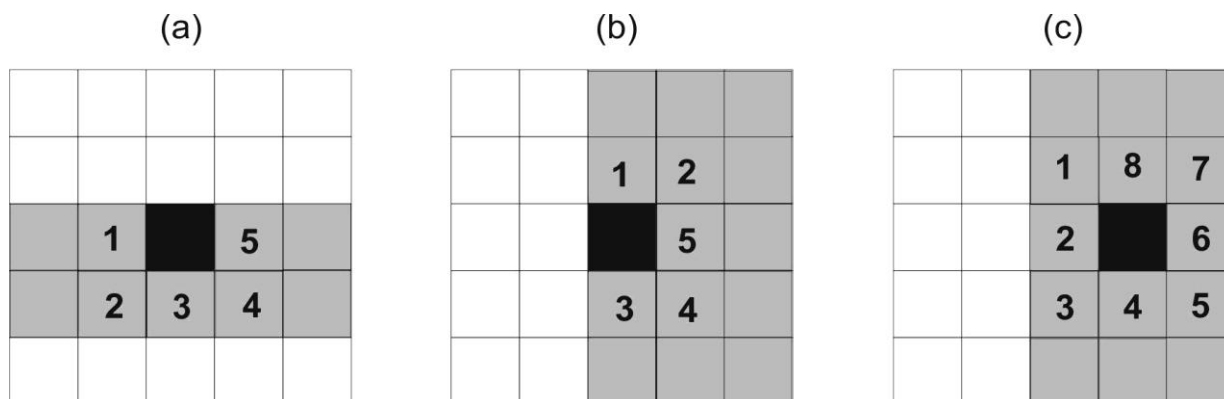
Jak se podrobnou analýzou ukázalo, je v tomto případě statistický popis histogramu pomocí ořezání na úrovni 5 % málo citlivý na jemnou strukturu. Případný stín vzniklý v dírcě dále ovlivňuje charakter histogramu a negativně tak ovlivňuje výsledek. Tato metoda také hodnotí statisticky oba typy struktur (hrubší a jemnější) dohromady, což se ukazuje jako nepraktické.

Výpočet **procentuálního zastoupení poruch v obraze** je založen na jednoduché úvaze, že v binárním obraze získaném vhodným prahováním (kap. 4.2.2) je možné všechny pixely s hodnotou 0 (černé) označit za poruchu/vadu. Vychází se při tom z předpokladu, že větší strukturovanost povrchu dírcy (větší množství vad) a větší velikost poruch ve struktuře, představuje větší množství černých ploch či bodů na obraze.

Tato metoda je velice jednoduchá a ukazuje se jako postačující pro jednoduché a rychlé hodnocení. Analýza ovšem hodnotí statisticky všechny vady ve struktuře a dá se snadno znehodnotit stínem, který se objeví při nedostatečném zbroušení vzorku a špatném „nasvícení“ vzorku v mikroskopu.

Analýza **procentuálního zastoupení sousedních pixelů stejné velikosti** opět vychází z prahování. V binárním obraze jsou hledány pixely, které mají více než 5 sousedů (pixelů) s hodnotou 0, tedy černé pixely prezentující vady (reprezentace pro osmi-sousedství, D_8). Černý pixel na Obr. 5.75 a, b má právě 5 sousedů a 5 sousedů budou mít také všechny číslované pixely, Obr. 5.75 a. Číslo 5 a více bylo zvoleno proto, že minimálně 5 sousedů mají pixely na hranici trhlinek a uvnitř trhlinek mají 8 sousedů (což je limitní hodnota), Obr. 5.75 c. Na snímku se vypočte procentuálně kolik pixelů má 5 a více sousedů vzhledem k celkovému počtu. Analýza se ukazuje jako vhodná k detekci relativně velkých a osamocených vad a

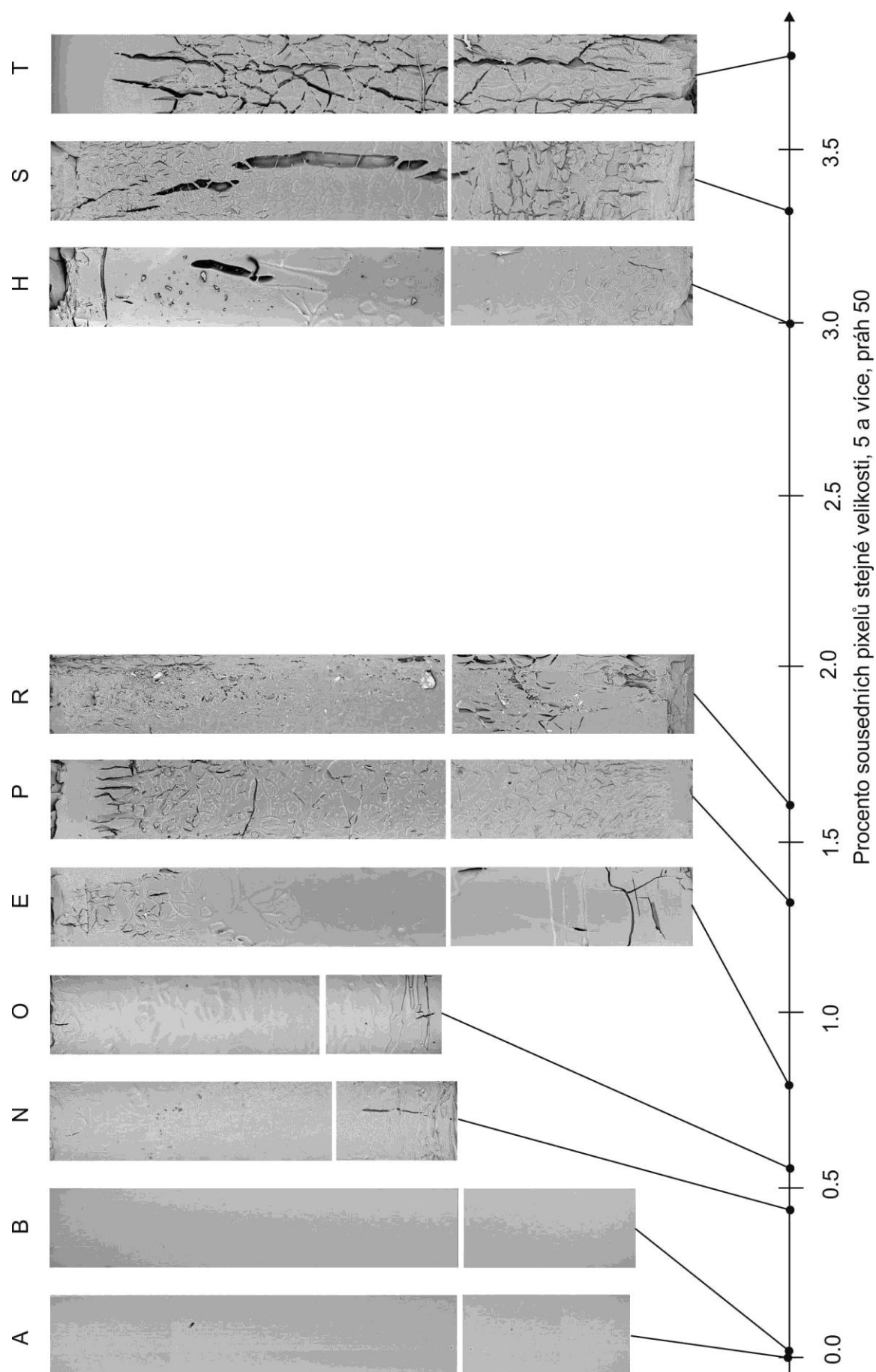
poruch, což je například hluboké rozpraskání u snímků dírek píchaného zboží, Obr. 5.76. Práh byl zvolen na úrovni šedi 50.



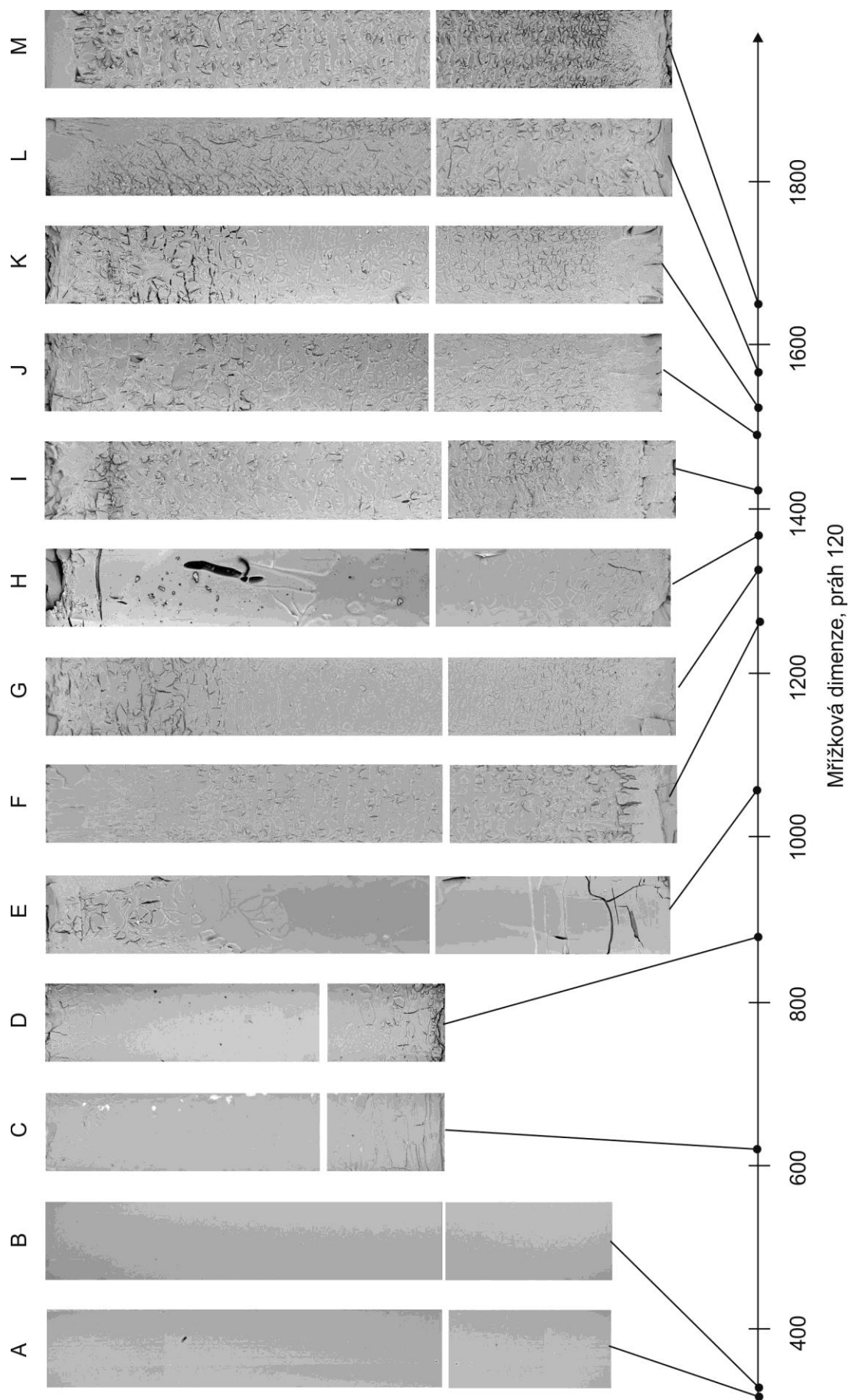
Obr. 5.75 Hraniční pixely, které zobrazují prasklinky, [1]

Fraktální geometrie se osvědčila především při popisu složitosti struktury, proto lze analýzu založenou na této geometrii, tzv. mřížkovou dimenzi (kap. 4.3.2) se zavedením jednoho prahu, úspěšně využít pro popis „mělkého rozpraskání“. Práh byl stanoven na úrovni šedi 120, kde je dostatečná citlivost na mělké rozpraskání a zároveň tato hodnota se nachází ve stanoveném rozpětí 110 až 190 pro přepočtení dimenze rozděleného snímku [1, 2], Obr. 5.77.

Pro celkovou analýzu struktury tohoto typu povrchu a pro danou kolekci dat se jeví jako vhodné použití dvou parametrů: počtu sousedů stejné velikosti a mřížkové dimenze. Popis a analýza struktury snímků je dále možná pomocí běžných algoritmů obrazových analýz, jako jsou binární morfologické operace eroze, dilatace, otevření a uzavření [4, 54, 56].



Obr. 5.76 Výběr povrchů dírek a jejich poloha podle procentuálního počtu pixelů s 5 a více sousedy – detekce prasklin, [1]



Obr. 5.77 Výběr povrchů dírek a jejich poloha podle vypočtené box dimenze – detekce jemného rozpraskání, [11]

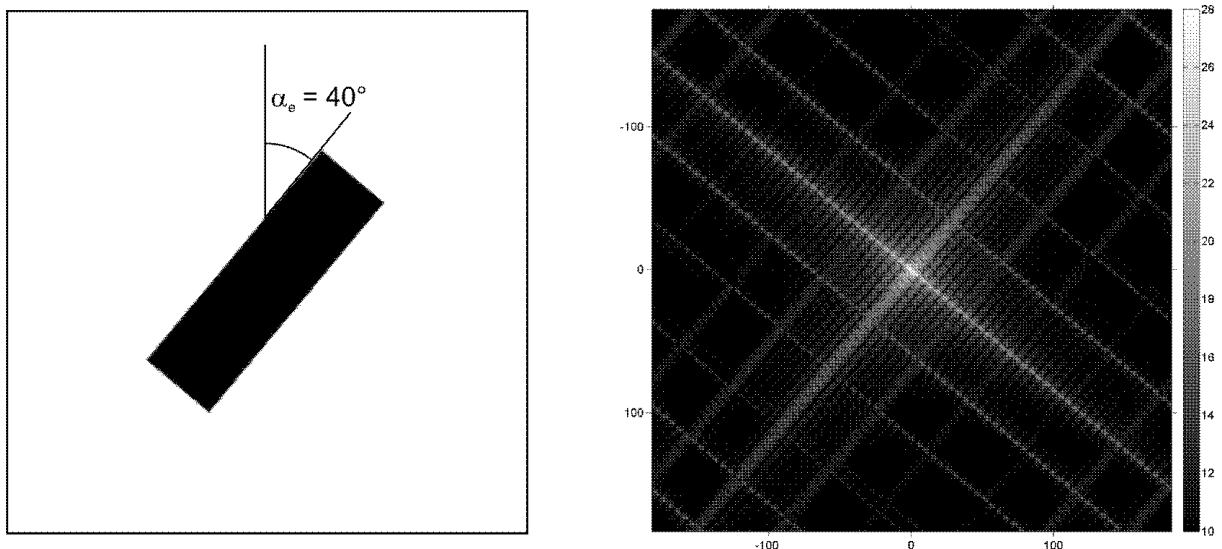
5.3.3 Příklad aplikace: hodnocení mechanicky matovaného skla

Vedle požadavku na hodnocení složitosti struktury a dominantních vad se vyskytují úlohy s požadavkem na směrovost struktury, takové požadavky jsou především u textilních struktur [132].

Směrovostí struktury je myšlen popis hlavních směrů, které struktura vytváří. Příkladem ze strojírenské praxe může být obrábění povrchu v určitém směru a pomocí analýzy lze kvantifikovat míru ovlivnění povrchu obráběcí technologií. Jiným příkladem může být vznik struktury na základě fyzikálního a (nebo) chemického procesu a snaha objektivně vyjádřit směry, které mohou souviset s danými procesy.

Při hodnocení směrovosti lze uplatnit několik přístupů. Jedním z nich je využití lineární integrální transformace, typicky Fourierovy transformace. Tato transformace vychází z principů používaných u signálů [4, 133–135] a je využívána především pro filtrace ve frekvenční oblasti, kompresi, rekonstrukci obrazu a detekci [14]. Nejprve je převeden vstupní obraz z prostorové oblasti do „frekvenční reprezentace“, je získán Fourierův obraz. Výsledkem transformace je spektrum prostorových frekvencí složené z imaginární a reálné složky. Fourierův obraz se filtruje a upravuje. Výsledek se inverzní integrální transformací převede zpět do prostorové oblasti na výstupní (upravený) obraz. Pro transformaci se ve výpočetní technice používá diskretní Fourierova transformace. Pro výpočet této transformace byly vypracovány algoritmy, které jsou zvláště efektivní při výpočtu na počítači a kterým se říká "rychlá Fourierova transformace".

Jednotlivé složky komplexní funkce ve formě matic je možné vyjádřit graficky a nejlépe v centrované podobě, kdy ve středu spektra jsou umístěny počáteční souřadnice [136]. Na Obr. 5.78 je zobrazeno již výkonové spektrum v logaritmickém vyjádření, zahrnující reálné a imaginární složky. V případě hledání hlavních směrů struktury v datovém snímku je vyjádření ve frekvenční oblasti přímo použito pro nalezení směrovosti. Jak je ukázáno na Obr. 5.78 hlavní směry odpovídají směrům ve frekvenční oblasti otočené o 90° .

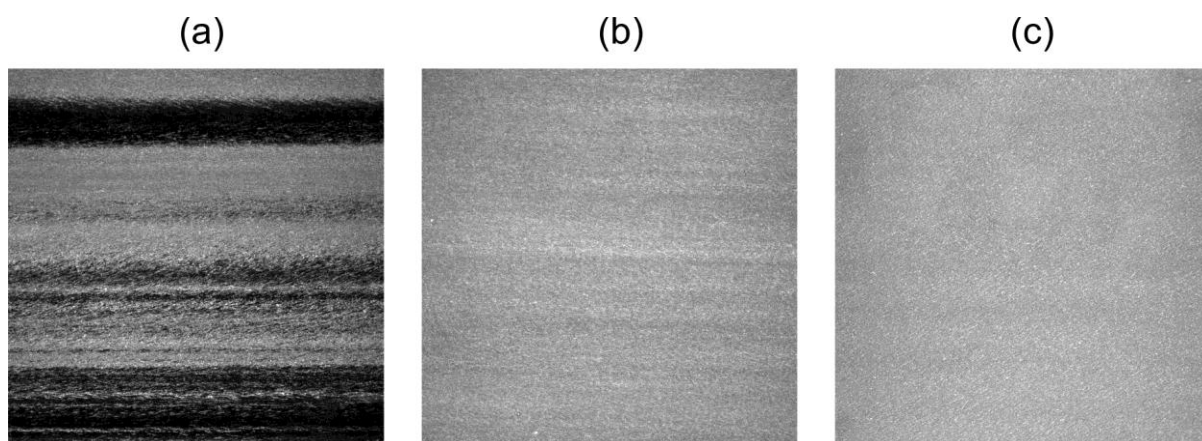


Obr. 5.78 Příklad analýzy směrovosti obdélníku, černobílý snímek a logaritmus výkonového spektra diskretní Fourierovy transformace

V případě uvedeného pootočeného obdélníku jsou patrné dva směry, které respektují jeho natočení. Směry spektra jsou kolmé na jeho hrany. Spektrum má větší hodnoty kolem středu, směrem ke kraji se zvětšují frekvence a je zde patrné i snižování amplitudy pro tyto vyšší frekvence.

Analýza směrovosti je prováděna právě na základě analýzy výkonového spektra, ze kterého jsou vybrány jen frekvence s nejvyšším zastoupením. Z nich jsou pak vybrána lokální a globální maxima. V případě ukázky hodnocení směrovosti na Obr. 5.78 je zobrazený obdélník otočen o úhel $\alpha_e = 40^\circ$, výsledek analýz je hlavní směr $\alpha_{e1} = 40,2^\circ$, váha $w_1 = 0,28$, další významný směr je $\alpha_{e2} = 130,2^\circ$, váha $w_2 = 0,09$. Druhý směr reprezentuje kratší hranu obdélníku. Váha reprezentuje míru dosažení maximální frekvence v daném výběru, maximum je 1 (100 %).

V rámci výzkumu a vývoje stroje pro mechanické matování plochého skla pomocí kartáče s diamantovými zrnky byla vyvíjena metodika pro stanovení celistvosti a směrovosti matovaného povrchu. Na Obr. 5.79 jsou vybrány ukázky obrazových dat (snímků) povrchově opracovaného plochého skla v různé jakosti o skutečné velikosti 100 x 100 mm. Analýzy byly provedeny pro binární snímky s prahem 120 (prahování snímků na úrovni 120). Z Tab. 5.14 jsou zřejmé rozdíly v jednotlivých analýzách.



Obr. 5.79 Ukázky hodnocené povrchové struktury mechanicky matovaného plochého skla s různou jakostí a strukturou

Pomocí těchto analýz je možné vcelku bez problému rozlišit jednotlivé struktury. V případě vzorků (b) a (c) jsou však rozdíly u některých analýz nízké a v praxi by nedokázaly spolehlivě popsat mírně se lišící struktury. Je tak třeba změnit nastavení analýz nebo je z metodiky vyloučit.

Tab. 5.14 Výsledky analýzy obrazových dat z Obr. 5.79

Vzorek		(a)	(b)	(c)
Statistický popis histogramu pomocí ořezání na úrovni 5 %	Šíře 90 %	156	67	62
	Medián	103	152	162
Procentuální zastoupení poruch v obraze (práh 120)		66%	3%	0%
Procento sousedních pixelů stejné velikosti v obraze (práh 120)		59%	1%	0%
Mřížková dimenze (práh 120) $D_{B\ 1000}$		1839	1591	952
Směrovost na základě DFT (práh 120)	Hlavní směr	90°	98°	59°
	Váha	49%	49%	61%

5.3.4 Další testované aplikace

Hodnocení 2D struktury nemusí být omezeno pouze na povrchové struktury. Jak bylo prokázáno v příspěvku [137], je možné objektivně kvantifikovat a zařadit do jednotlivých tříd i mikroskopické objekty, jako jsou například krystaly ve skle, Obr. 5.80. Klasifikace je jen ukázková, ale naznačuje možnosti jak automaticky hodnotit objekty z různých hledisek, v tomto případě složitost struktury a procento velkých shluků.

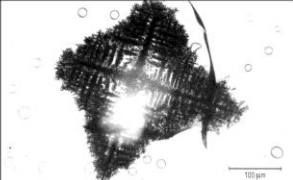
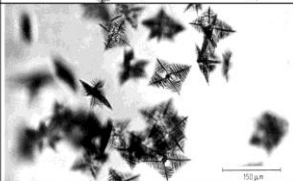
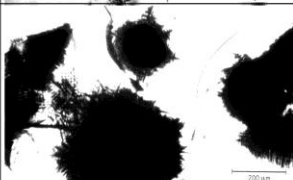
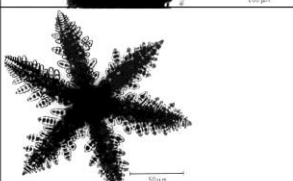
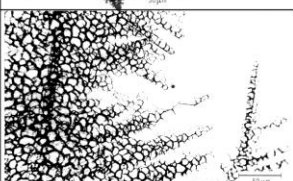
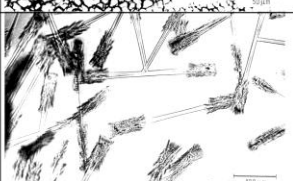

Připravována je také rozsáhlá analýza vzorků, které budou analyzovány pomocí tří základních metod získání dat z povrchu: jako metalografické výbrusy (křivky rozhraní), data z drsnoměru (získaný signál) a také jejich povrchové struktury zmíněnou metodikou v této kapitole. Data byla zatím analyzována z výstupu z drsnoměru [P3], více v kap. 5.4. Výsledky z dalších hodnocení by měly být následně porovnány a závěry tohoto základního výzkumu použity pro aplikace v praxi.

Ze zmíněných analýz je třeba vybrat výsledné parametry nejlépe popisující dané vlastnosti, které jsou předmětem studia a zájmu. V prvním kroku jsou provedeny všechny analýzy za účelem získat velkou část číselných parametrů, které lze vytěžit. Následně je prováděn výběr parametrů, který celkový výpočet zjednoduší a zrychlí. Z několika číselných parametrů lze také váhovým koeficientem získat pouze jednu číselnou hodnotu, která bude komplexně reprezentovat daný stav či jakost. Při aplikacích je třeba respektovat omezení a zohlednit závěry uvedené v kap. 5.1.4.1.

5.3.5 Závěr kapitoly

Hodnocení 2D struktury pomocí fraktální geometrie ve spojení se statistickými nástroji a Fourierovou transformací představuje slibný potenciál pro automatické a objektivní hodnocení míry strukturovanosti, náhodnosti, pravidelnosti, poměru velkých a malých vad, směrovosti struktury a další. Tato metodika má svá omezení, která jsou spjata především s pořízením obrazových dat (pozice snímače a zdroje energie, intenzita dopadající energie na

povrch struktury, nastavení snímače, povrchové vlastnosti struktury,...). Metodika je tak vhodná především ke kvantitativnímu porovnání dané sady vzorků snímaných v jedné sérii experimentu.

Vada (krystal)	Snímek	Mřížková dimenze D_{B1000} (práh 35)	Procento sousedních pixelů stejné velikosti v obrazu	Automatická klasifikace
Samostatný krystal kristobalitu		1566	9.64	C2
Krystal $Ba[BeF_4]$		1570	8.63	C2
Sférické krystalové klastry kristobalitu		1314	42.80	A5
Krystal $Ca_3(PO_4)_2$		1623	22.84	D4
Část krystalu tridymitu		1470	18.27	B3
Krystal $Ca[BeF_4]$		1438	4.78	B1
Křemenný krystal $BaO-TiO_2-3SiO_2$		1659	5.93	D2

Použitá pravidla:

Mřížková dimenze

$A < 1400$

$1400 \leq B < 1500$

$1500 \leq C < 1600$

$1600 \leq D$

Procento sousedních
pixelů stejné velikosti v
obrazu

"1" < 5

$5 \leq "2" < 10$

$10 \leq "3" < 20$

$20 \leq "4" < 30$

$30 \leq "5"$

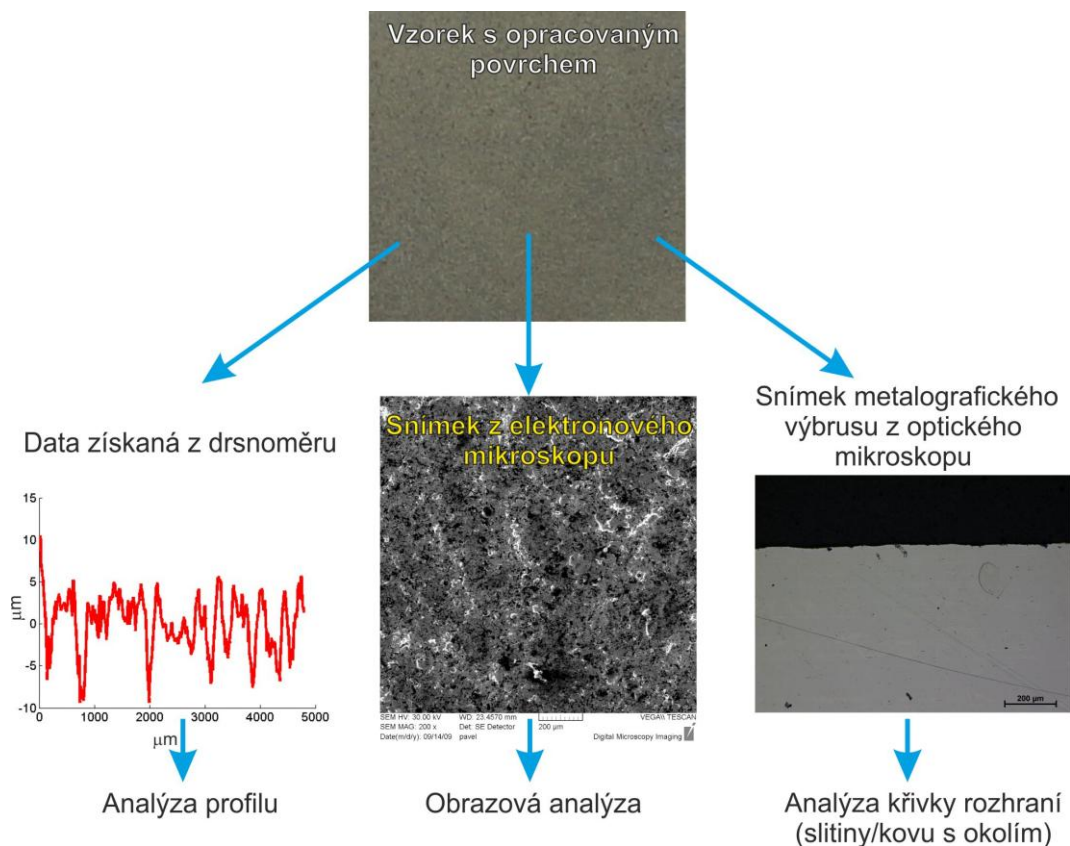
Obr. 5.80 Automatická klasifikace krystalů ve skle [P2]

V kapitole byly ukázány možnosti hodnocení struktur a lze tak prokázat široké možnosti uplatnění nejen pro laboratorní hodnocení, ale i pro průmyslovou praxi.

5.4 Kvantifikace dat z drsnoměru

Tato data nespádají do tématu habilitační práce, ale souvisí s ním z důvodu podobného zpracování dat a jejich interpretace. Souvisí také s širším projektem, který má za cíl analyzovat soubor vzorků pomocí různých metod získání dat z povrchu (Obr. 5.81):

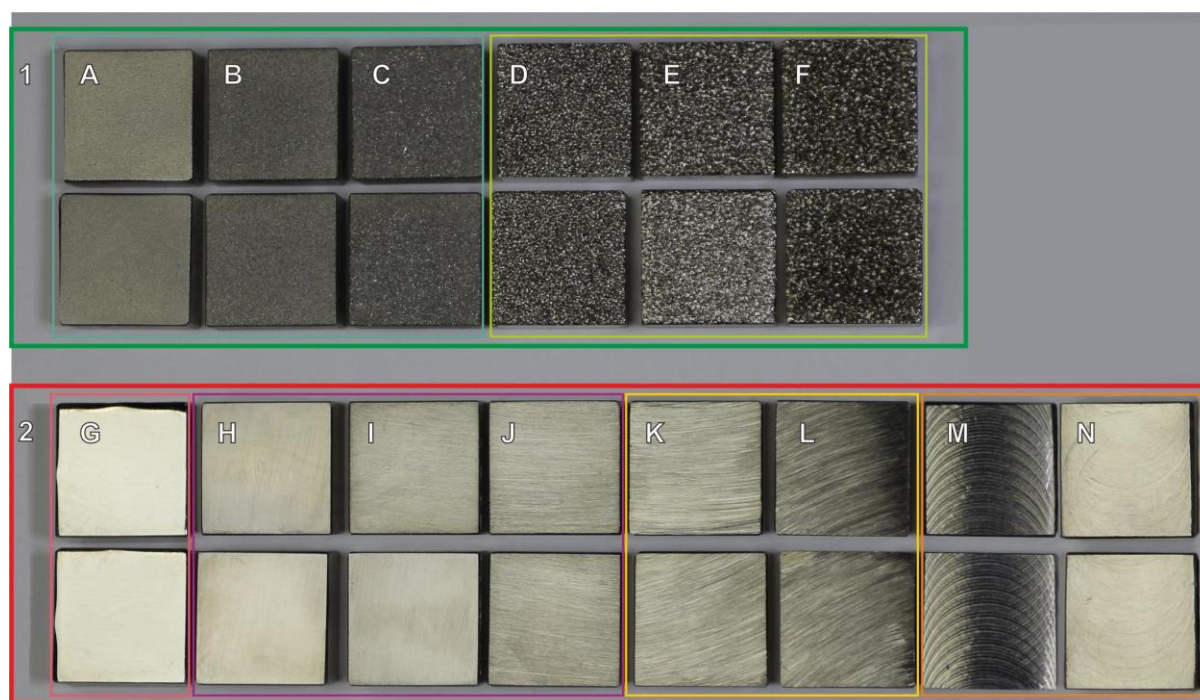
- profiloměrem (Mitutoyo SV 2000), získán je profil, což jsou topologicky jednodimenzionální (1D) data a jedná se o nedestruktivní měření, následuje **analýza profilu**,
- na elektronovém mikroskopu (rastrovací elektronový mikroskop VEGA-TESCAN), získána jsou data ve formě topologicky dvojdimenzionálních snímků (2D), jedná se o nedestruktivní měření a následuje **obrazová analýza** (kap. 5.3),
- snímáním rozhraní na metalografickém výbrusu (metalografická laboratoř vybavená zařízením firmy Beuhler s optickým mikroskopem EDIPHOT 200 – NIKON), získána jsou data ve formě topologicky dvojdimenzionálních snímků (2D), ze kterých je získáno topologicky jednodimenzionální rozhraní, jedná se o destruktivní měření a následuje **analýza křivky rozhraní** (kap. 5.1 a kap. 5.2).



Obr. 5.81 Měření vzorků, získání dat a použité analýzy, [P3]

Celkem je plánovaná analýza 14 typů vzorků s různým povrchem získaným různými technologiemi (celkem pět technologií výroby), Obr. 5.82 a Tab. 5.15. Obráběné vzorky jsou z nerezové oceli 15 x 15 x 8 mm, obráběný povrch měl před výrobou povrchové struktury stejné vlastnosti. Jak je zřejmé, vzorky mají odlišnou strukturu povrchu, která je snadno viditelná, ale mnohem obtížněji kvantifikovatelná. Výběr obráběcích technologií byl dán běžně používanými výrobními technologiemi v průmyslové praxi a lze je rozdělit (u analyzovaných vzorků) na technologie:

- generující náhodnou strukturu (tryskaný povrch balotinou a korundem a vytvořený elektroerozí, vzorky A až F),
- generující směrovou strukturu (leštěný povrch, opracovaný lapovacím papírem, smirkovým plátnem, technologie broušení, frézování, vzorky G až N).



Obr. 5.82 Zobrazení analyzovaných vzorků pro testování

Byla tak připravena ucelená škála vzorků povrchů vyrobených za přesně daných podmínek (celkem 30), které byly následně proměřeny. Uvedené metody reprezentují nejběžněji získaná data v průmyslové praxi, tedy ve formě 1D sekvence (signálu), dále snímky (není rozhodující pro následnou obrazovou analýzu, zda byl snímek pořízen elektronovým mikroskopem nebo průmyslovou kamerou či mikroskopem) a také rozhraní získané obrazovou analýzou ze snímku.

Tab. 5.15 Seznam analyzovaných vzorků, technologie jejich výroby a parametrů výroby

Vzorek (označení)	Technologie výroby povrchu	Použité parametry pro výrobu
A1 až A6	Povrch trykaný balotinou	Zrnitost č. 112
B1 až B6	Povrch pískovaný korundem	Zrnitost č. 36
C1 až C6	Povrch pískovaný korundem	Zrnitost č. 12
D1 až D6	Povrch vytvořený elektroerozí	29A
E1 až E6	Povrch vytvořený elektroerozí	72A
F1 až F6	Povrch vytvořený elektroerozí	54A
G1 až G6	Povrch leštěný	Na max. lesk
H1 až H4	Lapovací papír	Zrnitost K 400
I1 až I4	Smirkové plátno 120	Zrnitost 120
J1 až J4	Smirkové plátno 80	Zrnitost 80
K1 až K4	Bruska, růžový kotouč	Brousící kotouč karborundum
L1 až L4	Bruska, šedivý kotouč	Brousící kotouč, hrubý
M1 až M4	Frézka – rychlý posuv	Fréza prům. 20 mm, 120 ot./min., posuv 240 mm/min.
N1 až N4	Frézka – pomalý posuv	Fréza prům. 20 mm, 120 ot./min., posuv 30 mm/min.

Cílem metodiky ověřované na vzorcích pro všechny 3 měření bude:

- porovnání standardních a méně běžných parametrů pro hodnocení struktury,
- nalezení optimálních parametrů pro kompletní popis struktury,
- specifikace citlivosti na směrovost struktury jednotlivých parametrů, které z parametrů dokážou nejlépe kvantifikovat směrovost.

V analýzách jsou použity rozdílné parametry, které již byly popsány v kap. 4.3, kap. 5.1.1, kap. 5.1.4 a kap. 5.2.2. Cílem je nalézt ty parametry, které společně poskytují nejvíce informací o struktuře a jejích vizuálních vlastnostech.

Zatím byly provedeny analýzy dat z drsnoměru [P3]. Profil vzorků byl získán z přístroje Mitutoyo SV 2000 za podmínek: snímací hrot standardní s úhlem 60°, rychlost měření 0,5 mm.s⁻¹, měřicí síla 0,75 mN, měřená vzdálenost 4 800 μm, vzorkovací interval 0,5 μm. Bylo provedeno 9 měření v ose *x*, 9 měření v ose *y* a 9 měření příčně, pro každý ze 14 povrchů na 2 vzorcích, celkem 756 měření. Pro analýzu byl vyvinut softwarový nástroj v prostředí Matlab, který vypočítal jednotlivé parametry a zároveň umožnil hromadnou analýzu dat z měření.

Parametry pro popis profilu lze rozdělit do základních skupin:

- parametry amplitudy: Std směrodatná odchylka, Pa střední aritmetická úchylka profilu, Pt (rozsah) maximální výška profilu, parametry představují hloubku, do které zasahují změřitelné prohlubně,
- parametry frekvence: Sm střední rozteč nerovností profilu, počet výstupků a počet prohlubní, parametry představují četnost opakování prohlubní a výstupků na dané délce,
- parametry složitosti a deformace: D_{EEE} EEE dimenze (metoda hodnocení změny délky s eliminací nevýznamných extrémů [138]), L_R relativní délka křivky, L_P poměrná délka křivky a obvodová dimenze D_C , parametry představují složitost rozhraní a hladkost/strukturnost těchto křivek.

Výsledky analýzy jsou uvedeny v příloze této práce [P3] a lze je shrnout v několika větech. Bylo použito devět parametrů, které byly rozděleny na: parametry amplitudy, parametry frekvence, parametry složitosti a deformace. Pomocí korelačního koeficientu byl pro každou skupinu určen jeden parametr: průměrná drsnost profilu, Pa (parametr amplitudy), střední rozteč nerovnosti profilu, Sm (parametr frekvence), obvodová dimenze, $D_{C\ 1000}$ (parametr složitosti a deformace). Tyto tři parametry poskytují různé informace o datech a mohou být použity k úplné analýze dat.

V rámci výzkumu byla určena pro tyto typy povrchů citlivost na směrovost vzorku. Parametry složitosti a deformace: obvodová dimenze ($D_{C\ 1000}$), EEE dimenze ($D_{EEE\ 1000}$), relativní délka (L_R) a proporční délka (L_P) mohou být použity pro lineární rozpoznávání struktury prezentovaných dat. Na základě těchto výsledků lze vyvodit, že v této práci představené nástroje jsou vhodné pro rozpoznání směrových a nezávislých struktur. De facto jednosměrná analýza rozptylu (ANOVA) ilustruje citlivost parametrů složitosti a deformace na detekci náhodných struktur.

6 Problematika získání a interpretace obrazových dat u objektů z transparentních materiálů a s lesklým povrchem

Tato část je zaměřena především na možnosti získání obrazových dat z transparentních objektů a objektů s lesklým povrchem ve viditelném spektru elektromagnetického záření. Některé části výzkumu byly prováděny v koordinaci s prací na disertační práci [5] (kap. 6.5, 6.6 a kap. 6.7.1). Tato část je zaměřena více prakticky než předchozí kapitoly. V některých případech je řešení dotaženo až ke konstrukčnímu řešení zařízení pro aplikaci v průmyslové praxi.

Výzkum v této oblasti je významně podpořen dlouhodobě budovanou laboratoří pro získání a interpretace dat (od roku 2001). Laboratoř je v současné době vybavena několika desítkami kamer pro různé vlnové délky (UVA + UVB, VIS, IR), objektivů, filtrů, dále osvětlovačů, temným boxem, pracovištěm pro ověřování bezkontaktních technologií, počítači, potřebným software a dalším podpůrným zařízením.

Transparentní objekty obecně mají při snímání obrazových dat specifické vlastnosti. Vady uvnitř objektu jsou převážně viditelné, naopak získání informací o tvaru objektu je podstatně komplikovanější.

Pojem „transparentní objekt“ je nutné blíže specifikovat. V reálném světě kolem nás neexistuje běžná látka, která by byla transparentní v celém rozsahu elektromagnetického záření a pro všechny další možné použitelné energie pro získání obrazových dat (popsané v kap. 3). Pokud je uveden pojem transparentní materiál, předpokládá se, že propouští elektromagnetické záření ve VIS. Takovéto materiály ale nemusejí být propustné pro nižší nebo vyšší vlnové délky elektromagnetického záření. Transparentní materiály v oblasti VIS ovšem nemají úplnou propustnost (transmitanci) a část záření je pohlcována (absorbována). K absorpci může docházet v celé oblasti VIS spektra elektromagnetického záření nebo jen selektivně, určitých vlnových délek. Především vzhledem k zaměření autora práce jsou v následujícím textu principy detekce transparentních materiálů ukázány na běžném skle. Principy jsou ale přenositelné i na další transparentní materiály ve VIS spektru, jako jsou některé plasty. Principy lze teoreticky přenést i na tekutiny. Pojem detekce je v tomto případě myšleno získání dat a jejich interpretace za účelem získání informací (např. o tvaru objektu nebo jeho vadách).

V případě lesklých povrchů je problematika velice široká. Již samotný povrch skla odráží záření ve viditelné oblasti, a to v závislosti na úhlu dopadu paprsku (kap. 3.1.7.2, Obr. 3.4). Povrchy kovů jsou asi nejčastěji charakterizované jako lesklé. Příklad je následně uveden na detekci kovových misek (kap. 6.7.1).

6.1 Potenciální principy získání obrazových dat u objektů ze skla

V případě výrobků ze skla je možné se setkat se základními cíli získání a následné interpretace obrazových dat:

- detekce vad uvnitř výrobku,
- detekce (vad) tvaru a povrchu výrobku,
- detekce napětí ve výrobku.

Vady v běžných výrobcích ze skla se vyskytují vždy, o třídě jakosti výrobku pak rozhoduje jejich velikost a četnost. Vady uvnitř výrobku je možné (a výhodné) detekovat na základě získaných obrazových dat. Vady lze nejčastěji detekovat na základě lomu, odrazu a absorpce VIS. Mezi tyto vady patří především šlíry (kap. 6.2.4 a kap. 6.2.5), plynné uzavřeniny (kap. 6.2.1 a kap. 6.2.3) anebo krystalické fáze (kap. 6.2.2 a kap. 6.2.3).

Detekce tvaru výrobku může být zaměřena na získání počítačového 3D modelu objektu (získání tvaru z kontur, kap. 6.1.3), srovnání s počítačovým 3D modelem s následným výpočtem odchylek od modelu (kontrola autoskel kap. 6.5), zjišťování vad na povrchu výrobku (povrchové poškrábání mačkárenských tyčí, kap. 6.2.3), místo počátku deformace plochého skla (např. od bortu při výrobě plavením, kap. 6.6) a v neposlední řadě optického zvlnění (tzv. corrugation test kap. 5.2).

Mezi obrazovou analýzu je možné také zahrnout detekci vnitřního napětí ve výrobku pomocí kvantifikace dráhového rozdílů, kap. 6.1.1, příklad použití je v kap. 6.4.

Pokud mají být vady uvnitř objektu z transparentního materiálu identifikovatelné, pak rozhraní mezi materiálem objektu a vadou nebo samotné rozdílné materiálové složení objektu a vady musí být zvoleným fyzikálním principem detekovatelné. Podobně lze uvažovat při detekci tvaru, kdy materiál objektu musí umět odrážet, pohlcovat nebo vést k emisi detekovaného fyzikálního pole. Na základě analýzy možností (uvedených v kap. 3), je možné pro získání obrazových dat transparentních materiálů zvažovat využití:

- elektromagnetického záření:
 - optické záření ve viditelném spektru (VIS, 390 až 750 nm), kap. 3.1.7.4,
 - IR záření blízké, krátké, střední až dlouhé vlnové délky (750 až 12 000 nm) s využitím tzv. termovizních kamer, kap. 3.1.7.7
 - UV záření (UVA + UVB, 200 až 390 nm), kap. 3.1.7.6,
 - rentgenové brzdné záření (RTG, 0,001 až 10 nm), kap. 3.1.8,
- zvukového vlnění (ultrazvuku), kap. 3.4,
- teoreticky elektrické impedanční tomografie, kap. 3.5,
- teoreticky kontaktní (mechanické) metody, kap. 3.6,
- laboratorní, pomocí elektronového mikroskopu, kap. 3.2.

6.1.1 Detekce pomocí optického záření ve viditelném spektru

Uplatnění detekce pomocí VIS je logické, protože v této oblasti jsou objekty průhledné a vady uvnitř a na povrchu výrobku narušují optickou čistotu těchto objektů. Například vady mohou mít jiný index lomu (jedná se o skelné nehomogenity), čímž dochází na rozhraní k lomu paprsku a tím se stávají viditelnými (vady deformují procházející světlo), příkladem takové vady mohou být šlíry (kap. 6.2.4 a kap. 6.2.5). Rozdílného indexu lomu se také využívá při zjišťování míry distorze (zkreslení) optických výrobků nebo výrobků jako jsou autoskla, která mají mít nižší než maximální předepsané zkreslení.

Vady uvnitř objektu mohou být ve formě plynné uzavřeniny (plynné nehomogenity), kde na rozhraní dochází k lomu a odrazu (kap. 6.2.1 a kap. 6.2.3) anebo krystalické fáze (krystalické vměstky), kde na jejich rozhraní dochází k odrazu a pohlcení světla (kap. 6.2.2 a 6.2.3). Vady uvnitř výrobku, jako jsou kaménky, bublinky a povrchové škrábance, lze tak správným osvětlením skleněného objektu „rozsvítit“, tj. vyvolat odraz od rozhraní do mnoha stran.

Odraz světla při dopadu kolmo na povrch běžného skla je okolo 4 %, podíl odraženého paprsku se zvětší až při relativně velkých úhlech, kap. 3.1.1. Tohoto jevu lze potenciálně využít pro detekci tvaru, a to především odrazu liniového paprsku od povrchu skla a jeho projekce na bílou desku, kap. 6.6. Odrazu od povrchu je také používáno u corrugation testu (kap. 5.2).

Při selektivní absorpci dochází ke změně barvy skleněného objektu, čehož lze využít k detekci tvaru objektu (např. zelené nebo hnědé láhve jsou mnohem lépe detekovatelné než bezbarvé) a nežádoucích vad způsobených změnou barevnosti. U automobilových skel, která jsou přibarvována a mají tak modrozelený nádech, je využíváno již zabarvením způsobené dostatečné absorpce pro jejich detekci. Přířez skla je možné vcelku spolehlivě identifikovat při položení na bílý difúzně-odrazivý podklad (pozadí, většinou dopravní pás). Použité je přední plošné osvětlení s tmným zorným polem (dark-field lifting, kap. 3.1.7.4, [3]). Kamera může být umístěna nad skleněným objektem, ale je potřeba redukovat odrazy a zbylých odrazů na snímku se zbavit následnou softwarovou filtrací nebo úpravou obrazu (například pomocí morfologických operací). Záření emitované osvětlovačem prochází objektem ze skla, pak se odráží od bílého difúzně-odrazivého podkladu a prochází sklem znovu. Projde tedy sklem dvakrát, světlo okolo se odráží přímo (nedochází k absorpci) a směřuje do objektivu kamery. Snímaný objekt ze skla je o něco tmavší než bílý podklad a tak je jeho 2D průmět tvaru dobře detekovatelný. Takto lze definovat pozici přířezu ze skla pro uchopení robotem. Podobně lze využít absorpci v celé oblasti VIS spektra.

Uvažovat lze také o spontánní emisi záření (kap. 3.1.3), která může být jiná pro vadu a pro materiál objektu při zvýšené teplotě, kdy je emitované záření ve VIS spektru (nad 525 °C), případně je možné využít také luminiscence některých skel. Spontánní emisi záření lze využít při detekci tvaru dávky skloviny. Podmínkou je, aby za sledovanou samostatnou dávkou (kapkou) nebo kontinuálním výtokem bylo tmavé pozadí, bez odrazu a bez zdroje VIS. Příklad takové detekce je uveden v kap. 6.3.

Převážně ve VIS spektru pracují také konfokální chromatické snímače (kap. 3.1.7.5). Jedná se o velmi přesné bodové snímače vzdálenosti, které umějí detekovat také vzdálenost transparentních materiálů. Pokud mají být získána obrazová data, je třeba snímače umístit do rastru nebo se snímačem (případně detekovaným objektem) pohybovat (např. na SMS stroji) do míst měření. Možností je oba přístupy zkombinovat a pohybovat například více snímači tvořícími linii nebo detekovaným objektem pod linií snímačů. Příklad aplikace pro detekci tvaru je v kap. 6.5.

Do detekce ve viditelném spektru je možné zahrnout také kvantifikaci vnitřního pnutí na základě sledování dráhového rozdílu řádného a mimořádného paprsku pomocí polarizačního přístroje. Pro detekci napětí ve skle je běžně využíváno polarizované bílé světlo. Pro sklo je charakteristické, že je látkou izotropní, tzn., že jeho vlastnosti, včetně vlastností optických, jsou ve všech směrech stejné. Jestliže je ve skle přítomno napětí, ať již způsobené nedokonalým vychlazením nebo vyvolané účinkem vnější síly, stává se sklo opticky anizotropním a vykazuje dvojlom. Znamená to, že paprsek světla dopadající na povrch takového skla se štěpí na paprsky dva, řádný a mimořádný, které jsou polarizovány v navzájem kolmých rovinách. Následkem rozdílné rychlosti obou paprsků při průchodu sklem vzniká mezi nimi dráhový rozdíl (fázový posun). Dráhový rozdíl obou paprsků Δ je přímo úměrný dvojlomu ve skle a délce dráhy paprsku sklem d . Dvojlom ve skle je přitom přímo úměrný napětí σ , které jej vyvolalo. Spojením těchto závislostí vznikl základní vztah pro výpočet napětí ve skle [139]

$$\Delta = B \cdot \sigma \cdot d, \quad (6.1)$$

kde Δ je dráhový rozdíl řádného a mimořádného paprsku [nm],

B – fotoelastická konstanta skla, u běžných sodnovápenatokřemičitých skel má hodnotu přibližně $25 \text{ až } 28 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}$ (častěji je uváděno $2,5 \text{ až } 2,8 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$);

σ – napětí ve skle [MPa];

d – délka dráhy světla ve skle [cm].

Maximální přípustné hodnoty napětí ve skle jsou pro jednotlivé výrobky uvedeny v normách. Protože kontrola vnitřního napětí ve skle se provádí na polarizačních přístrojích, jsou tyto maximálně přípustné hodnoty udávány přímo jako maximálně přípustný měrný dráhový rozdíl (vztažený na 1 cm tloušťky měřeného skla) v $\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}$ [13, 139].

Rychlá kvalitativní metoda využívá polariskopu, kvantitativní stanovení se provádí v polarimetru se Sénarmontovým kompenzátorem. V kap. 6.4 je ukázka detekce napětí v předním autoskle. Využití optického elektromagnetického spektra ve viditelné oblasti má své praktické výhody, mezi které patří:

- zdravotní nezávadnost,
- relativně malé tepelné ovlivnění měřeného objektu,
- jsou dostupné snímače s dostatečně velkým rozlišením,
- je zvládnutá technologie pořízení a zpracování dat,
- přijatelná cena.

Přirozenou hlavní nevýhodou využití těchto snímačů pro detekci transparentního skla je, že většina záření ve viditelné oblasti čirým sklem projde. Tento výčet výhod a nevýhod platí také pro NIR záření.

6.1.2 Detekce pomocí IR záření

IR záření je používáno především k měření teplot, kap. 3.1.7.7. Detekce objektu ze skla a jeho vad je také možná, ale je nutné respektovat transparentci (maxima a minima absorpce) skla v různých oblastech IR spektra a také pro různé teploty.

Jak se uvádí v [140], minimum absorpce (nejvyšší propustnost viditelného záření) skla se nachází na vlnových délkách 1 200 až 2 700 nm (v krátkých vlnových délkách) a v úzké oblasti kolem 500 nm (to je již VIS oblast), pak v transparentním čirém skle jsou dosažitelné efektivní hloubky měření teploty od 10 do 100 mm. To v praxi znamená, že lze měřit teplotu skla i uvnitř. Pokud vady v této hloubce mají rozdílnou teplotu, pak je lze detekovat, kap. 6.2.5.4. Je-li však měřeno na vlnových délkách, kde se termovizní kamera může dívat částečně skrz vrstvu skla, je nutné vědět, jaká část detekované energie pochází od této vrstvy, jaká část od vrstev, kterými záření prochází a jaká od pozadí za touto vrstvou. V těchto případech není vhodné uvažovat o emisivitě povrchu skla. Je zapotřebí uvážit původ záření a vymezit část energie, která pochází ze skla a část, která je původem z pozadí. Pro detekci vad pod povrchem (v dané hloubce) je tak třeba vybrat vhodnou vlnovou délku. Vzhledem k uvedené transparentci není vhodné uvažovat o detekci tvaru.

Pro vlnové délky nad 5 000 nm se jedná o povrchové měření. Běžné termovizní kamery mají rozsah 7 500 až 14 000 nm, obvykle se doporučuje nastavit koeficient emisivity na hodnotu $\varepsilon = 0,96$, což odpovídá 4 % záření odraženého od povrchu skla. Tato hodnota emisivity jde spolehlivě použít pro vlnové délky do 8 000 nm, protože nad touto vlnovou délkou významně vzrůstá odrazivost povrchu skla a ekvivalentně klesá koeficient emisivity. Pro měření teploty povrchu skla jsou tak vyráběny termovizní kamery s vlnovou délkou okolo 8 000 nm. Tato vlnová délka je také vhodná pro detekci tvaru objektu. Při této vlnové délce je již objekt ze skla viditelný při běžných teplotách, neboť spontánně emituje záření v těchto vlnových délkách (maximum emisivity je na zhruba 90 °C pro černé těleso). Tvar lze získat z obrysu (kontury), kap. 4.4.7. Detekovaný objekt by měl být mírně zahřátý a umístěn na chladnějším otočném stole, pozadí by mělo být také chladnější. Je provedeno sejmutí objektů v daných pozicích, následně jsou získány kontury se znalostí vzájemné pozice objektu a snímače, pak je možné vypočítat 3D model objektu. Předpokládanou nevýhodou je malé rozlišení snímačů – termokamer. Teoretickou možností je také využití odrazu tepelného záření (bodů, linií nebo rastru) vlnových délek nad 8 000 nm od povrchu objektu ze skla. Tyto a vyšší vlnové délky lze teoreticky využít pro měření vzdálenosti a získání 3D modelu (aktivní triangulaci, kap. 4.4.1).

V současné době je experiment připravován, byly pořízeny termokamery pro různé vlnové délky. Bude připraveno laboratorní zařízení a potřebný software pro detekci, získání kontur a získání 3D obrazových dat.

Využití IR záření pro detekci objektů a vad má výhody:

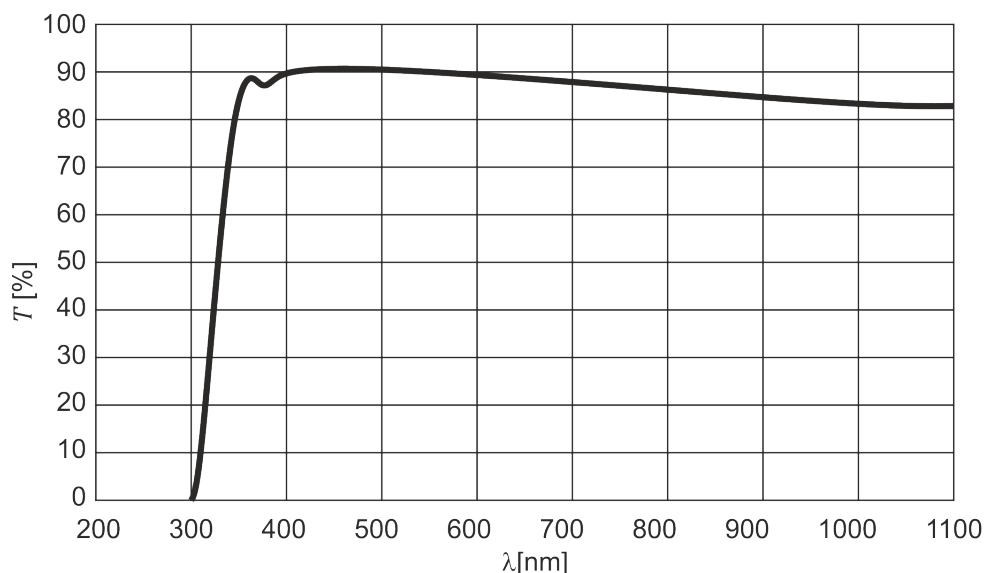
- zdravotní nezávadnost při krátkých dobách osvitů,
- je zvládnuta technologie pořízení a zpracování dat,
- lze sledovat IR oblasti, které přináší další informace.

Nevýhody jsou především:

- možné tepelné ovlivnění měřeného objektu při osvětlování objektu v IR vlnových délkách,
- dostupné jsou snímače s dostatečně velkým rozlišením pouze v NIR oblasti, která není pro měření vzdálenosti vhodná,
- nejsou dostupné snímače s dostatečně velkým rozlišením pro využitelné MWIR záření,
- pro detekci vzdálenosti a získání 3D modelu jsou použitelné vlnové délky nad 8 000 nm, což snižuje přesnost měření,
- relativně vysoká cena.

6.1.3 Detekce pomocí UV záření

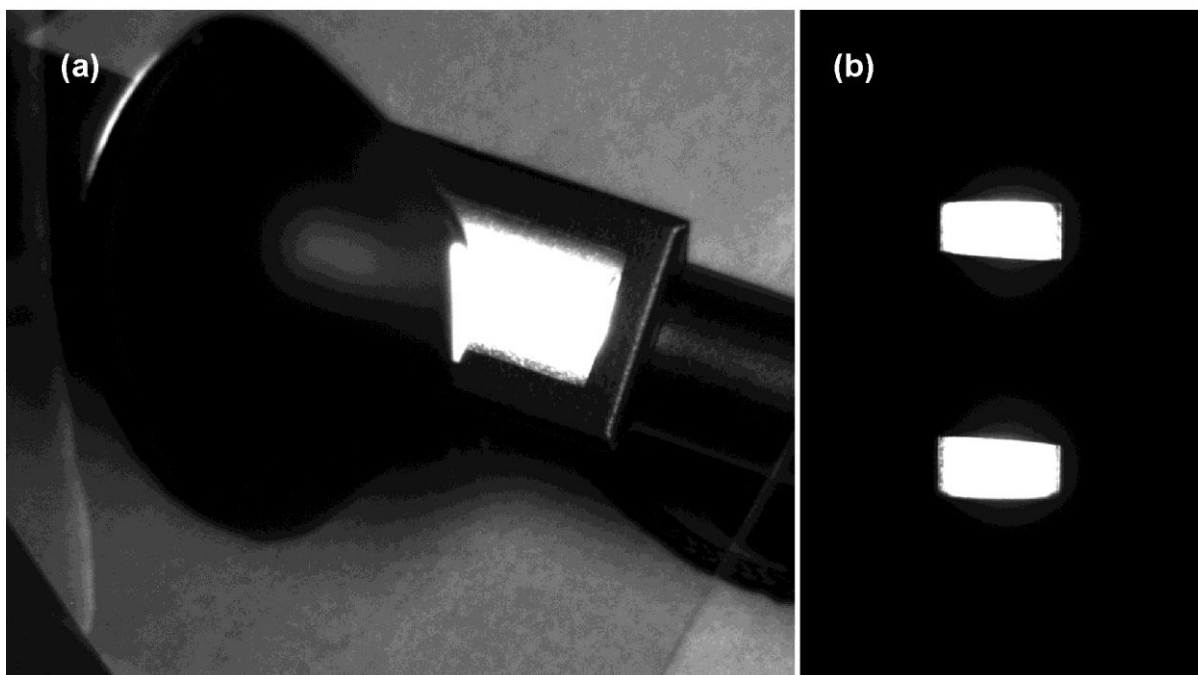
Na Obr. 6.1 je zobrazen graf spektrální propustnosti (transmittance) plochého skla tloušťky 1,1 mm běžného složení od společnosti AGC Flat Glass (Thailand) Public Company Limited, [141]. Jak je zřejmé, záření s délkou pod 300 nm již tímto sklem neprochází (je především pohlceno). Dále se změnou tloušťky se počátek spektrální propustnosti posouvá směrem doprava k vyšším vlnovým délkám. Systém pro detekci tohoto skla, který bude využívat neprůhlednosti skla, musí pracovat s vlnovými délkami pod 300 nm.



Obr. 6.1 Graf spektrální propustnosti (transmittance) plochého skla tloušťky 1,1 mm běžného složení, podle [141]

Jak bylo ověřeno pomocí laboratorního zařízení na pracovišti autora, sklo je pro tyto

vlnové délky skutečně neprůhledné, Obr. 6.2 (b). Použit byl pásový filtr v rozsahu vlnových délek 170 až 275 nm (BP250-25.5, výrobce Midwest Optical), UV kamery JAI CM-140 GE-UV, objektivem 25 mm F/2.8 UV LENS W/C-MOUNT. Tvar objektu jako 3D počítačový model lze získat opět z obrysu (kontury), kap. 4.4.7. Objekt ze skla by měl být snímán z několika pozic při znalosti vzájemné polohy kamery a objektu. Pozadí by měl tvořit plošný UV osvětlovač s vlnovými délkami minimálně od 250 nm. Z takto získaných dat by byla získána kontura a následně vytvořen 3D model objektu. Předpokládanou nevýhodou může být opět nízké rozlišení snímače. Možnostmi získání takovýchto obrazových dat se zabývá práce [142].



Obr. 6.2 Snímky plochého skla se zadním osvětlením - zdroj UV záření (UVA + UVB-254 nm): (a) tloušťky 3,8 mm, překrývající úplně zdroj záření s kapkou oleje, použit pásový filtr BP365-25.5, (b) tloušťky 1,1 mm, šířky 26 mm překrývající částečně zdroj, pásmový filtr BP250-25.5

Ověřenou možností je detekce znečištění výrobků (nejen transparentních) organickými oleji v UVA spektru elektromagnetického záření. V tomto případě postačuje pro detekci využití vlnových délek od 315 do 390 nm (při použití filtru BP365-25.5), jak je uvedeno v [142].

Možnou otázkou využití je také detekce vad, za předpokladu, že různé složení skla bude mít různé pohlcení UV záření, kap. 6.2.5.5.

Využití UV záření pro detekci objektů a vad má výhody:

- dosahované přesnosti,
- záření je již sklem pohlcováno,
- lze sledovat UV oblasti, které přinášejí další informace
- relativně malé tepelné ovlivnění měřeného objektu.

Hlavní nevýhody jsou:

- zdravotní závadnost záření,
- nejsou dostupné snímače s dostatečně velkým rozlišením,
- relativně vysoká cena.

6.1.4 Detekce pomocí rentgenového brzdného záření

V současné době se lze v průmyslové praxi setkat s vcelku znatelným rozšiřováním radiografie pomocí rentgenového brzdného záření (především pro účely defektoskopie), kap. 3.1.8. Ceny zařízení se při současných požadavcích na kvalitu stávají rentabilnějšími. Testy s detekcí vad probíhají také u transparentních materiálů. Nicméně jejich využití nemusí být až tak přímočaré a logické vzhledem k tomu, že výrobky z transparentních materiálů jsou již ve VIS spektru průhledné. Využití je možné spatřovat při zviditelnění vad, které jsou i v transparentních materiálech obtížně zjistitelné, jako jsou např. šlíry (kap. 6.2.4), nebo u skel, která jsou opakní (neprůhledná). Řešení této problematiky je zmíněno v kap. 6.2.5.6.

Nevýhodou současných zařízení je především dlouhá doba detekce vzorků při získání 3D obrazových dat, dále problematické nakládání se vzorky (jsou ozářené, probíhá v nich solarizace, a proto nemohou být následně použity), také nutnost kvalifikované obsluhy a přísné hygienické podmínky. Celkově shrnuto, získání informací obrazových dat skleněného objektu je perspektivní, ale cena, časová náročnost, technické problémy a hygienické opatření zatím neumožňuje rentabilní využití pro běžnou sklářskou výrobu.

6.1.5 Detekce pomocí ultrazvuku

Princip využití zvukového vlnění byl již uveden v kap. 3.4. Ultrazvukové snímače lze použít minimálně ve dvou případech:

- defektoskopie,
- odměřování vzdálenosti.

Ultrazvuková defektoskopie je založena na použití vysokých akustických frekvencí pro zjištění vlastností materiálu a vad o frekvenci 1 až 10 MHz [45]. Používají se dvě metody: průchodová a odrazová (kap. 3.4). Pro zjištění defektu je důležité jeho rozhraní, pokud se bude jednat o rozhraní sklo/vzduch (bubliny) je detekce možná, neboť od tohoto rozhraní se ultrazvukové vlny odrážejí. U dalších typů vad, jako jsou kaménky nebo rozdílné složení (např. šlíry) není možnost detekce prokázána.

Stejně jako u použití rentgenového brzdného záření, není použití pro transparentní materiály jednoznačné (pokud se nejedná o skla opakní nebo silně zabarvená). Nutností opodstatnění je detekce vad u transparentních skel, které jsou obtížně detekovatelné pomocí pole elektromagnetického záření ve viditelné oblasti, to ovšem není prokázáno. Dalším omezením pro rychlé použití v technické praxi je nutnost zajištění průchodu

ultrazvukových vln mezi ultrazvukovou sondou a materiálem vhodnou přechodovou látkou (voda, olej, vazelína), aby se odstranila vzduchová vrstva, která brání vytvoření dokonalé akustické vazby. Vývoj v této oblasti detekce vad je vhodné sledovat.

Ultrazvuku je používáno také ke snímání vzdálenosti od objektů z transparentních nebo lesklých materiálů. Snímače jsou většinou bodové, pro získání obrazových dat je možné je umístit do rastru anebo lze s nimi náležitě pohybovat do míst měření. Problémem může být odraz ultrazvukových pulzů a nutnost, aby povrch nebyl příliš odkloněn od normály měření. Výsledky u skel jsou podobné jako u lesklých kovových částí, kap. 6.7.1.

6.1.6 Další teoretické možnosti

Využití elektrické impedanční tomografie (kap. 3.5) ve sklářském průmyslu je reálné pro nalezení teplotních a chemických rozdílů při tavení a dávkování skloviny (která je dostatečně elektricky vodivá). Například hlava dávkovače může být osazena systémem elektrod, které budou provádět vyhodnocení vodivosti v jednotlivých rovinách, a podle počtu elektrod by bylo možné dosáhnout potřebného rozlišení. Zvažováno je využití této metody pro využití při detekci uvnitř skloviny při nižších viskozitách, jako je nepřímé měření teploty skloviny při tavení [143], elektrickém tavení [144], akumulace ušlechtilých kovů při tavení skla [145] a další. Zásadním problémem však zůstává vysoká teplota a agresivita skloviny, která vede k opalování elektrod.

Teoreticky je možné využít i mechanických kontaktních metod pro stanovení tvaru transparentního objektu (kap. 3.6). V úvahu mohou připadat taktilní snímače, využití proudění tekutin, měřicí souřadnicové stroje a drsnoměry.

U taktilních snímačů (s použitím elastomeru nebo s optickými vlákny, kap. 3.6) je výhodné, aby získaná data byla rastrována. Snímač s maticovým uspořádáním musí být v kontaktu s transparentním objektem. Využití pro detekci výrobků z transparentních materiálů je v současné době omezené.

Reálně jsou používány souřadnicové měřicí stroje, kdy při pohybu snímací hlavy lze získat mračno bodů a z něj pak následně obrazová data. Na snímací hlavě je pak vhodné použít konfokální snímače, kde získávání souřadnic jednotlivých bodů je pak rychlejší a data mohou být také získána za pohybu. SMS stroje jsou reálně používány v průmyslových laboratořích.

Mezi mechanické odměřování patří také mechanická energie tekutin pro odměřování vzdálenosti na základě změny tlaku v trysce nad měřeným objektem. Zde je ovšem limit použití rozsahu snímače do 0,3 mm, vyšší rozsah znamená již zhoršení linearity snímače (závislosti změny tlaku na vzdálenosti od měřeného objektu). Uplatnění pro měření sklářské produkce lze najít velmi omezeně, například pro odchylky v rámci vyráběného plochého skla.

Povrch skla je také možno odměřovat pomocí drsnoměru vybaveného zařízením pro 3D topografii (zajišťující posun v další ose). Využití je spíše ve vývojových a vědeckých laboratořích.

Použití rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) je možné jen na povrchu skla (kap. 3.2). Povrch sledovaného vzorku skla se pokryje tenkou (10 až 20nm) vrstvou kovu (Au, Pt, Pt+Pd) tak, aby byl povrch detekovatelný. SEM mikroskopy se používají ke studiu povrchové struktury skla především ve výzkumu. Příklad je uveden v kap. 5.3.2, kdy povrch dírky perličky byl získán na SEM mikroskopu a následně byla provedena analýza získaných obrazových dat.

Teoreticky lze uvažovat i o dalších možnostech, ale buď jsou to metody, které jsou pro detekci vhodné jen teoreticky a/nebo extrémně drahé a tedy v praxi nerentabilní. Metody jsou uvedeny v [146].

6.2 Příklad aplikace: návrh detekce vad mačkárenských (polooptických) tyčí

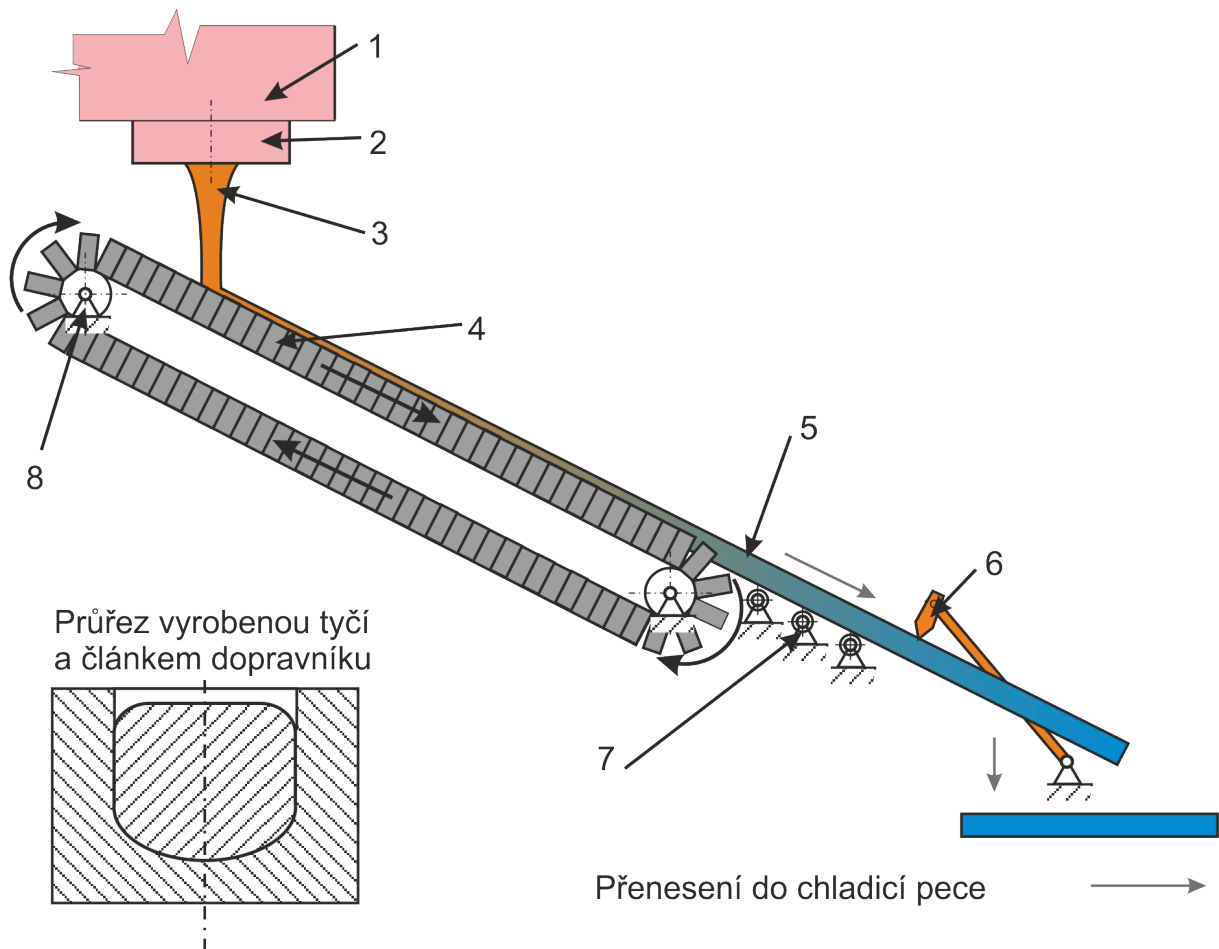
Jako příklad je v této kapitole uvedena detekce vad uvnitř a na povrchu mačkárenské tyče. Cílem prezentovaného výzkumu bylo stanovení možných metod detekce častých typů vad uvnitř tyče a na tyči přímo na lince. Dále stanovení možných metod detekce vad s dlouhou dobou změny výskytu v provozní laboratoři a i zde navržení potenciální metody inline měření [G14].

Mačkárenské tyče jsou polotovarem pro výrobu široké škály bižuterních a optických výrobků. V případě tyčí pro výrobu optických výrobků jsou tyče nazývány jako polooptické, kdy technologie výroby je stejná, ale požadavky na kvalitu jsou vyšší (v dalším textu je používáno pojmu mačkárenská tyč, který je obecnějším pojmem).

Zjednodušený popis technologie výroby je následující. Sklovina se buď taví v pánvi (obsah asi 400 kg) s kruhovým otvorem, který je po dobu tavení uzavřen kovovou, vodou ochlazenou zátkou (pro menší série) nebo v denní či kontinuální vaně (větší série). Přes výtokovou misku natéká sklovina na kovový článkový dopravník („článkovou formu“) a články vytvářejí nekonečný žlábek, který je sklovinou vyplněn. Článková forma tvaruje boky a spodek skleněné tyče a odvádí většinu tepla. Vrch je tvarován povrchovým napětím a je z této strany také odváděna část tepla do okolí, Obr. 6.3 [13, 147, 148].

Parametry, které se při lití tyčí nastavují, jsou rychlost dopravníku a teplota vytékající skloviny (odpovídající dané viskozitě). Článková forma musí odvést dostatek tepla, aby se tyč následně samovolně nedeformovala. Po opuknutí a odlomení tyče na požadovanou délku se tyče ukládají do chladicí pece.

Ve strojní výrobě jsou běžně rozeznávány 4 druhy průřezů tyčí, a to: slabý (průřez 27 x 25 mm), střední (30 x 30 mm), silný (35 x 31 mm) a extrasilný (43 x 37 mm) [148] a délka tyčí je 1 100 mm +/-100 mm. Touto technologií se vyrábějí i bloky pro výrobu větších kusů výrobků ze skla (např. 60 x 58 mm a 90 x 30 mm). Pohyb článkového dopravníku je oproti výrobě mačkárenských tyčí mnohem pomalejší [147].



Obr. 6.3 Schéma strojní výroby mačkárenských tyčí: 1 – pánvová pec, žlab denní nebo kontinuální vany, 2 – výtoková miska s kruhovým výtokem, 3 – výtok skloviny (přibližně 1 000 °C), 4 – článkový dopravník tvořící „nekonečnou“ formu, 5 – tyč, 6 – mechanismus opuknutí a odlomení, 7 – kladková dráha, 8 – rám stroje, [147]

Tyče jsou používány při dvoustupňové výrobě jako polotovary pro další tvarování, výroba je často jen mechanizována nebo ruční. Tyče jsou buď znovu přetaveny a slouží jako zdroj skloviny pro výrobu menších objektů nebo jsou jejich konce natavovány v mačkárenských pecích a natavený konec následně tvarován technologií mačkání nebo lisování. Takto jsou tvarovány také čočky do reflektorů a interiérové doplňky do automobilů. Požadavky na optickou jakost jsou tak vyšší než u běžné bižuterie, proto jsou i zvýšené nároky na výstupní jakost polotovarů – tyčí. Rozpoznávání musí být tyto typy vad:

- a) bublinky,
- b) kaménky,
- c) povrchové poškrábání,
- d) šířky.

Obecně se jedná o nejčastější vady, které je potřeba detekovat (v různé míře) u mnoha výrobků ze skla. Vady pro daný výrobek jsou specifikovány nejčastěji svoji velikostí a počtem. V případě těchto vad je využíváno transparence hodnoceného objektu, neboť právě průhlednost objektu ze skla pro VIS spektrum je těmito vadami narušována.

V současné době je kontrola kvality mačkárenských tyčí manuální (pomocí lidských očí) a o výsledku rozhoduje především zkušenost operátora. Kontrola je rozdělena na hodnocení:

- kaménků, bublinek a povrchových vad,
- šlír.

Charakter těchto dvou skupin vad je rozdílný. Z časového hlediska se výskyt šlír mění v průběhu několika hodin. Podle informací z provozu se šlíra mění od 1 hodiny do 10 hodin, v průměru 6 hodin. V případě ostatních vad mohou být změny podstatně rychlejší. Z hlediska optické detekce je možné první skupinu vad identifikovat. Šlíry je prakticky nemožné detekovat opticky na výrobku bez použití imerzní kapaliny, případně bez úpravy čela tyčí (broušení a leštění).

Optimálně navržené zařízení pro hodnocení vad tyčí by mělo být rozděleno na dvě části, které budou provádět kontrolu na různých místech a v různém časovém režimu. Šlíry až v desítkách minut u odebraného vzorku a ostatní vady u 100 % výrobků v uvedených taktech výroby tyčí.

6.2.1 Vznik bublinek ve skle

Vliv bublinek (plynných nehomogenit) je v tavicím procesu většinou příznivý. Bublínky se podílejí na úspěšném utavení kvalitní skloviny díky podpoře rozpouštěcích procesů ve sklovině a podpoře proudících procesů vedoucích k homogenizaci skloviny. Následně však musí být před tvarováním odstraněny, neboť jinak ovlivňují nepříznivě jakost vyráběné produkce.

Zdrojem bublin jsou podle [146]:

- rozklad a další reakce surovin,
- špatně (nebo nedokonale) provedené čření (proces zbavení bublinek v tavenině) a nukleace nebo růst nukleí v důsledku přesycení taveniny plyny,
- chemické reakce v tavenině nebo na jejím rozhraní (např. stěny tavicího agregátu, atmosféra v agregátu, ...)
- elektrochemické reakce (při elektrickém tavení průchodem elektrického proudu sklovinou),
- mechanické vlivy (např. míchání skloviny, dávkování, ...)

Identifikace zdroje bublin je důležitá pro jejich odstranění. K tomu slouží jak zpětná vazba, tak i numerická simulace. V případě mačkárenských tyčí je detekce vad také důležitá pro stanovení jakosti a případně vyřazení výrobku, který nesplňuje limitní velikost a počet bublinek na jednu tyč.

6.2.2 Výskyt kaménků ve skle

Kaménky (krystalické vměstky) mohou mít různou velikost a složení. Kamének se u transparentních výrobků ze skla (s dostatečnou průhledností) projevuje jako „estetická“ vada

(opticky patrný, neprůhledný vměstek). Zároveň je i vadou „technickou“, protože působí napětí v okolním skle v důsledku rozdílné teplotní roztažnosti. Zdrojem kaménků jsou podle [146]:

- koroze žáruvzdorného materiálu (60 až 80 % kvantitativního výskytu),
- neprotavení vsázky vlivem špatného promísení, homogenizace, granulometrie, nízkých teplot v agregátu atd. (20 až 25 %),
- krystalizace skla (sklo přechází ze skelné fáze do fáze krystalické, tzv. odskelnění, 10 až 15 %).

Obecně tato vada může mít původ ve velmi široké oblasti technologie produkce výrobků ze skla. Od surovin, jejich přípravy, transportu a zakládání, přes tavení, tavicí agregát a jeho vyzdívku, teplotu skloviny, její dávkování, výjimečně pak tvarování, tepelné zpracování a zušlechtnění výrobku (odskelnění). U mačkárenských tyčí je možný původ kamínků na počátku výrobní technologie (od surovin) až po dávkování (z dávkovače a hlavy dávkovače).

Identifikace zdroje kaménků a jejich odstranění je velice důležitým procesem při výrobě skla, ale také velice komplikovaným a náročným procesem vyžadujícím hluboké znalosti a zkušenosti. Vedle zpětné vazby je důležitá identifikace kaménků také pro zařazení výrobků do tříd jakosti, případně vyřazení nejakostního výrobku.

6.2.3 Detekce povrchových vad, bublinek a kaménků ve skle

Současný způsob detekce povrchových vad, bublinek a kaménků (bez detekce šlír) je následující:

- 1) Tyč položí operátor do vidlic vrchní stranou chlazenou vzduchem nahoru (strana, která nebyla v kontaktu s formou – dopravníkem a má lepší kvalitu povrchu), spočítá bublinky a kaménky.
- 2) Tyč ve vidlicích pootočí operátor na oba boky, zkontroluje vrchní část boku na přítomnost rzi a odřenin.
- 3) Vyhovující tyč operátor zabalí do papíru, špatnou tyč vyřadí a zapíše výsledek kontroly do tabulky v průvodce.

Tyč musí vyhovovat vnitřním pravidlům pro třídění optických tyčí. Tyč je vyřazena pokud:

- čistá tyč obsahuje více než 2 kaménky,
- tyč obsahuje bublinky a je v ní více než jen 1 kamének,
- tyč obsahuje více než 7 počítatelných bublin (bublin určité velikosti),
- prachové bublinky tvoří shluky,
- je poškrábána vrchní strana tyče,
- jsou škrábance a rez ve vrchní polovině boku,
- jsou tzv. řetízky (řetězíci se bublinky).

Obrazová analýza, jako náhrada vyhodnocení operátorem pro posouzení jakosti tyče musí zajistit rozeznání těchto vad a jejich kvalifikaci.

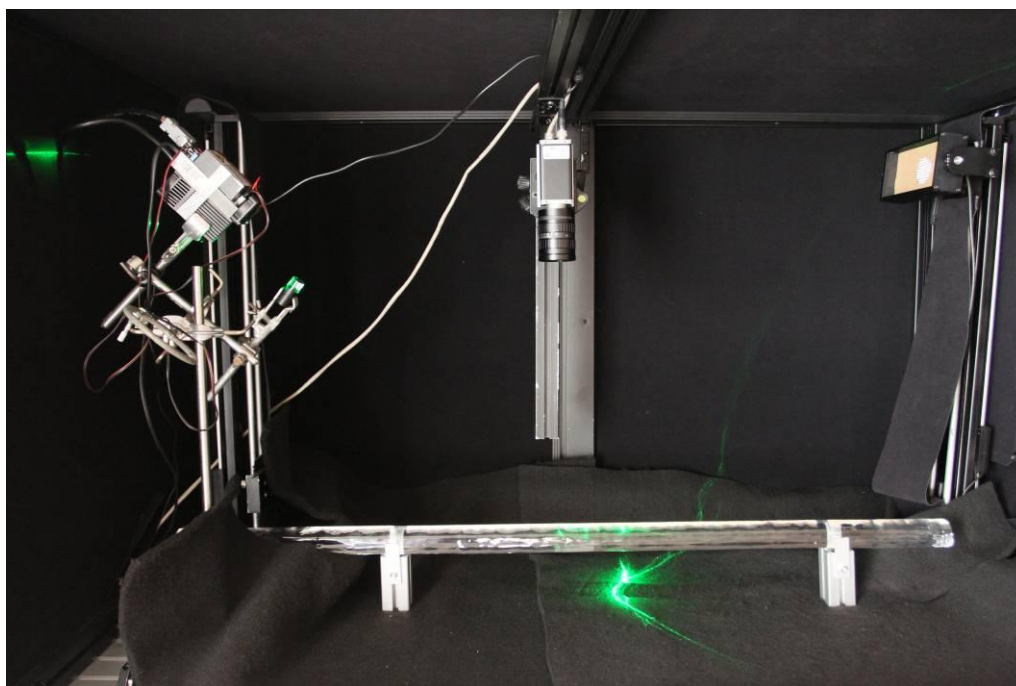
Jako vhodné se jeví použití optických senzorů ve VIS spektru. Existují i jiné možnosti, a to použití NIR a rentgenového záření.

Pro experimenty byla použita barevná (RGB) kamera Basler piA2400-17gc s rozlišením 5 Mpx (2 454 x 2 056 px), rychlostí snímání 17 snímků za sekundu, interface GigE, objektivu Kowa s ohniskovou vzdáleností 5 mm, světelností f1.8 a objektiv FUJINON s ohniskovou vzdáleností 12,5 mm, světelností f1.4 (pro snímání laserem). Kamera byla připojena na PC s operačním systémem Windows 7 a snímání bylo provedeno pomocí software Pylon 4.

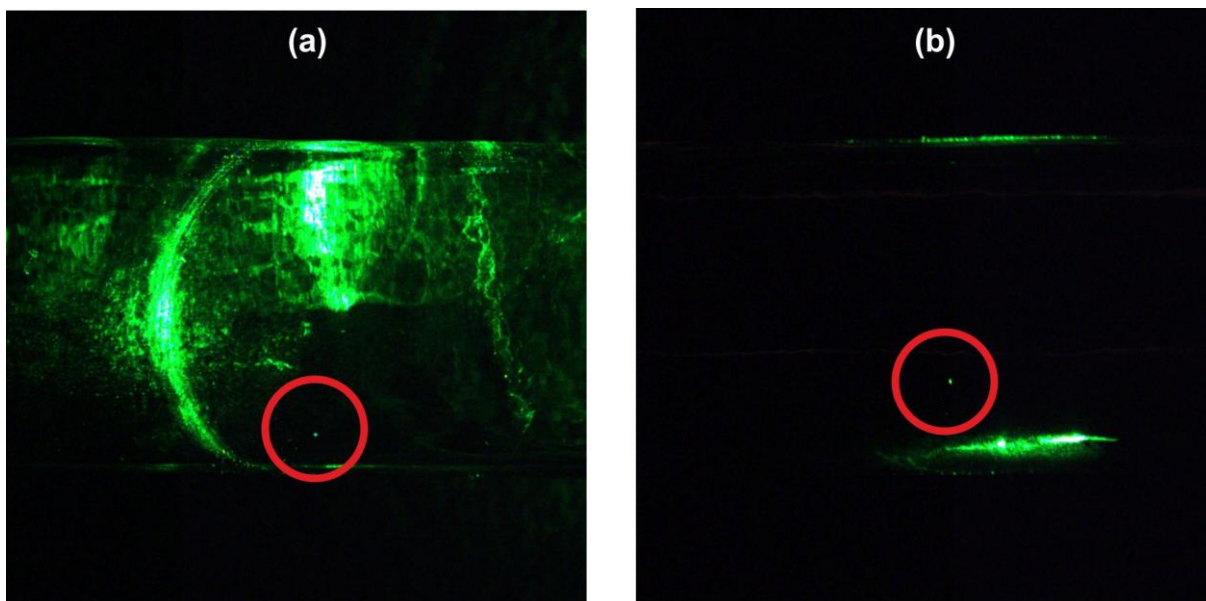
V rámci výzkumu byly testovány dva základní přístupy, které mají za cíl zviditelnit vady uvnitř a na povrchu tyče:

- 1) Princip prosvětlení tyče pomocí liniového laseru.
- 2) Princip prosvětlení tyče bočním intenzivním osvětlením.

U prvního principu byl použit laser třídy 4, pracující v zeleném spektru (vlnová délka 530 nm), Obr. 6.4 a laser třídy 3B, pracující v červeném spektru (vlnová délka 660 nm). Laser byl použit pro horní osvětlení pod úhlem 45° a boční osvětlení. V obou případech se podařilo zvýraznit stejnou vadu, Obr. 6.5. Jak je zřejmé z obrázku, rozsvícení vady pomocí horního osvětlení pod úhlem je problematické z pohledu dalších optických jevů. Tyč nemá hladký povrch, takže při vstupu a výstupu světla dochází k rozptylu světla v relativně širokém pásu. Světlo se díky své intenzitě také odráží od tmavého pozadí v temném boxu. Vše dohromady velmi ztěžuje následnou obrazovou analýzu, nicméně správným nastavením a odstíněním nežádoucích odlesků lze tyto vlivy eliminovat. Mnohem lepší výsledky byly dosaženy pomocí bočního prosvětlení laserem, kdy se rozsvítí spolu s vadou jen okraje tyče. Základní nevýhodou tohoto principu je absence kontroly jakosti dalších optických vad, jako jsou škrábance a rez.

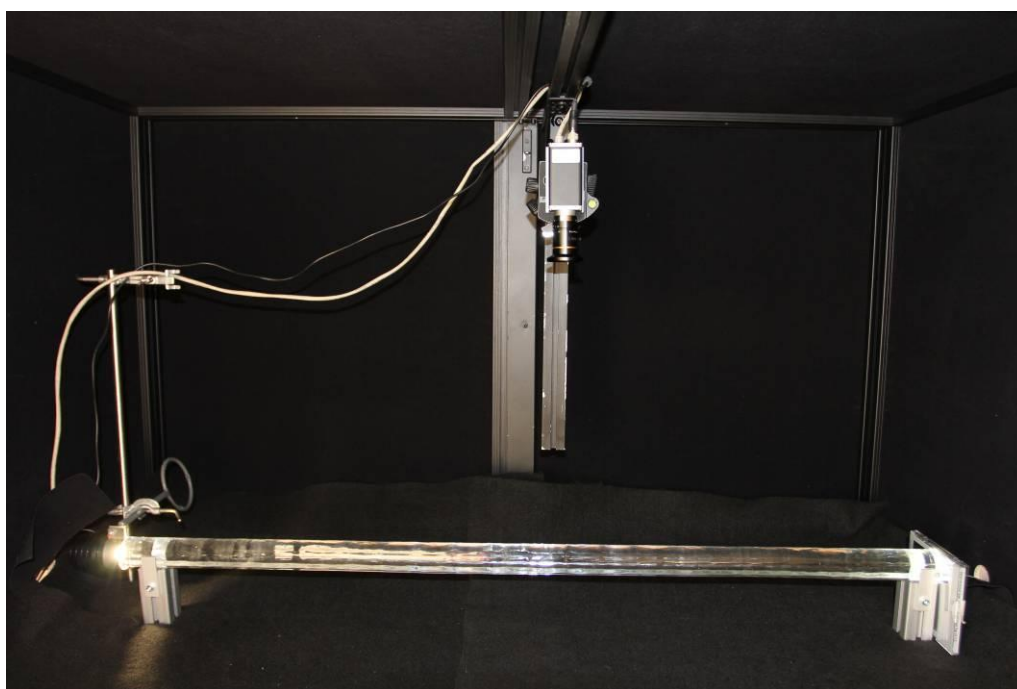


Obr. 6.4 Detekce vad v mačkárenské tyči pomocí kamery – prosvětlení laserem



Obr. 6.5 Výsledky detekce vady pomocí laseru (a) horním prosvětlením pod úhlem 45°, (b) prosvětlením z boku tyče

U druhého principu bylo použito intenzivního LED zdroje, který je umístěn v místě lomu tyče (oddělení tyče z kontinuální výroby před vložením do chladicí pece). Jedná se o využití stejného principu, který je nyní použit pro subjektivní stanovení jakosti, ale operátor je nahrazen kamerou. Při testech bylo použito jednoho zdroje osvětlení, a to s a bez zrcátka, Obr. 6.6. Výsledky jsou dostatečně kvalitní pro detekci vad po takřka celé délce tyče. Je předpoklad úspěšné detekce škrábů, řetízků a rzi.



Obr. 6.6 Detekce vad v mačkárenské tyči pomocí kamery – boční prosvětlení

Při experimentech byl použit LED zdroj světla bez možnosti regulace intenzity osvětlení, proto změna jasu v obraze byla prováděna pomocí clony, Obr. 6.7. Další možností je změna času a kontrastu.

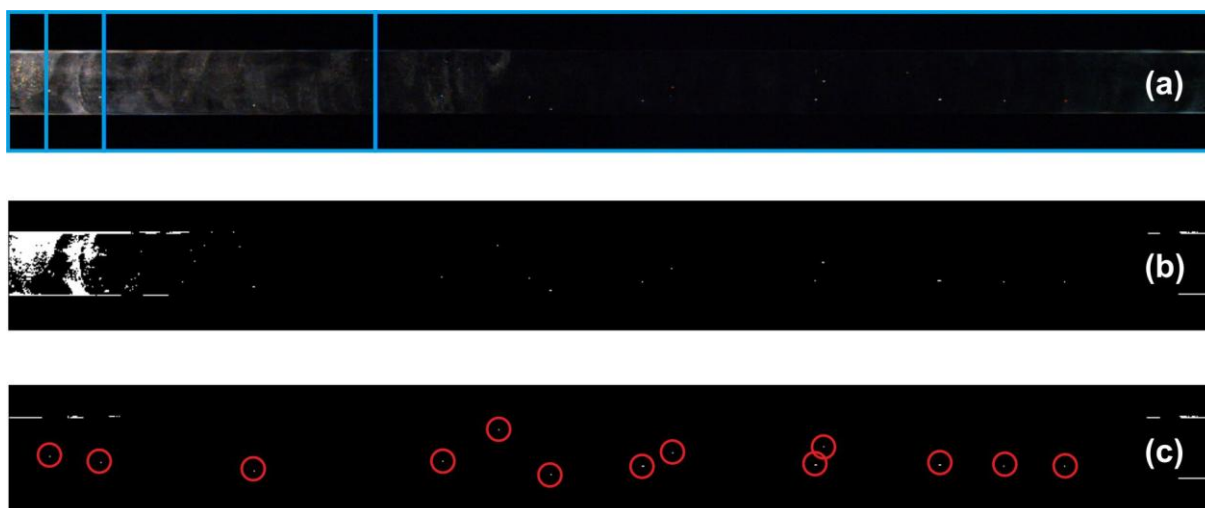


Obr. 6.7 Změna clonového čísla u kamery snímající mačkárenskou tyč

Tak jak je tyč osvětlena, jsou vnitřní vady ve formě bublin a kaménků detekovatelné v různých částech s odlišným nastavením clony na objektivu kamery. V temnější části je ideální clona nižší, u zdroje světla, kde je světlo vycházející z tyče intenzivnější, je třeba použít clonu vyšší. Protože změna clony vyžaduje objektiv se servomotorem a jeho řízením, je vhodnější se s daným stavem vyrovnat v rámci zpracování obrazových dat.

Vady jsou vcelku jednoduše detekovatelné prahováním, tedy převodem snímku na binární obraz (kap. 4.2.2). V obraze pak jedničky (bílé pixely) představují vadu (světlo) a nuly (černé pixely) okolí a tyč bez vad (tma). Pro detekci vad v různě jasných částech tyče jsou pak vhodné různé prahy pro převod snímku na binární obraz. Je tak nutné snímek rozdělit na několik částí a ty prahovat na různých úrovních, Obr. 6.8. Jak je z obrázku zřejmé, je možné tímto postupem detekovat vady v různých částech. Prahování může být provedeno i „spojitě“, kdy se spojitou změnou jasu (intenzity osvětlení) se mění také spojitě práh. Tyto operace nejsou výpočetně náročné.

Stejně jako při použití laseru i zde dochází k rozsvícení okrajů, ovšem jen v úzkém pásu odpovídajícím skutečnému povrchu tyče. Toto rozsvícení okrajů není započítáno do hodnocení jakosti tyče.



Obr. 6.8 Detekce bublin s proměnným prahem, (a) rozdělení snímku tyče na zóny s různým prahem (clona $N = 4$), (b) použití konstantního prahu 80, (c) použití různých prahů na zóny a zobrazení detekovaných vad

Jednotlivým vadám ve formě bublinek a kaménků je možné na základě jejich jasů na snímku přiřadit velikost v pixelech (po kalibraci lze převést i na přepočtené velikosti v mm). Vyhodnocení jakosti bude provedeno na základě počtu bublinek od dané velikosti. Hranici velikosti pro posouzení nepřijatelného počtu bublin je nutné stanovit na základě dlouhodobých experimentů a ve spolupráci s operátory na lince. Bublinky na této hranici budou nejvíce problematické, neboť sporné případy budou rozhodovány automaticky, bez ohledu na danou potřebu vyrábět i ve vyšší jakosti. Samozřejmostí je v tomto případě možnost získat graf četnosti velikostí bublinek, který může být z uvedeného pohledu lepším řešením hodnocení jakosti.

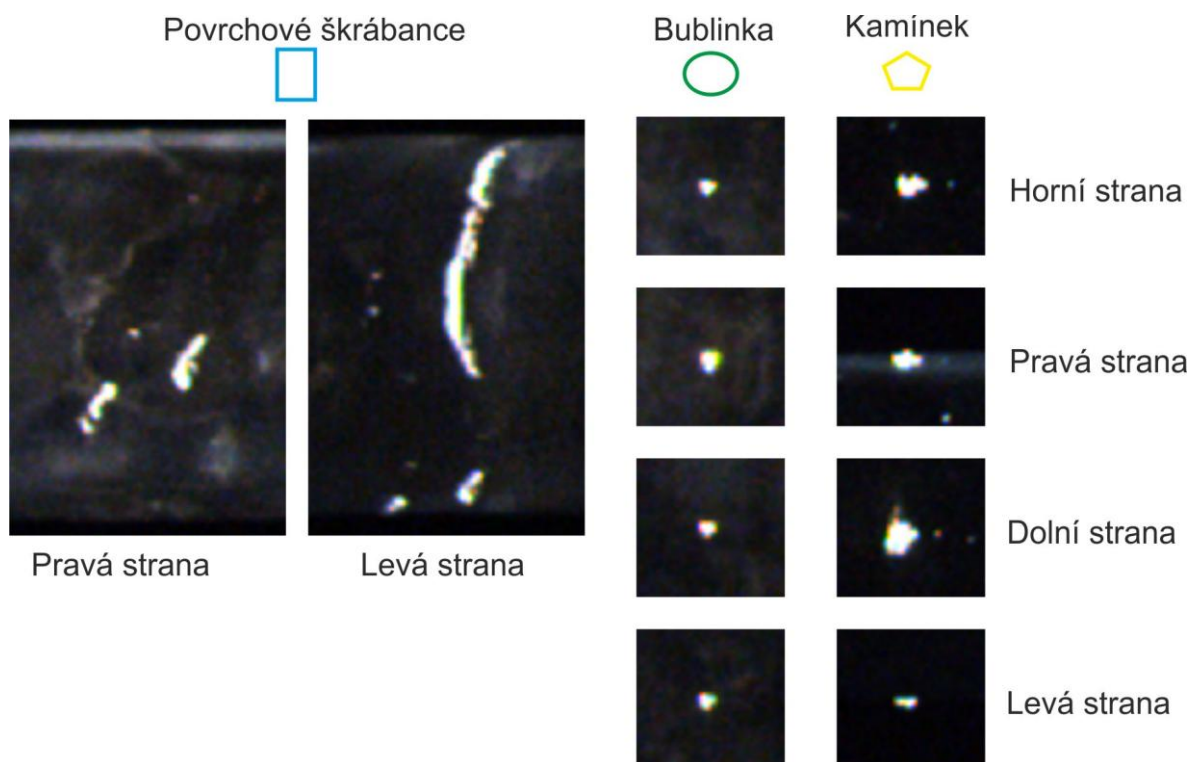
Velikost detekovaných bublinek se mění s polohou tyče. Na Obr. 6.9 a Obr. 6.10 je uvedena ukázka detekované bublinky. Je nutné zvážit, jak bude probíhat hodnocení jakosti, tedy jaká velikost bublinek bude brána za směrodatnou (největší, průměrná, ...). Bublinky se ovšem v tyči mohou při pootočení „pohybovat“ vlivem optických efektů. Detekovat, zda se jedná o jednu a tutéž vadu po otočení, může být problematické z pohledu vývoje daného algoritmu.

Pro hodnocení jakosti je nutné rozeznat kaménky od bublinek. Na Obr. 6.9 se jeví kaménky a bublinky velmi podobně, ale při patřičném zvětšení (Obr. 6.10) je již možné tyto dvě vady odlišit. Struktura kaménku je mnohem členitější než bublinky. Dané zvětšení je dáno rozlišením kamery a použitým objektivem. Při použitých parametrech kamery a objektivu v experimentu lze kaménky a bublinky odlišit analýzou tvaru vad.

Detekce povrchových vad při daném osvětlení je také možná, ale projevy těchto vad mohou být komplikované, Obr. 6.9. Vada se vyskytuje na pravé straně (detail je na Obr. 6.10). Na levé straně se pak zobrazí jako opticky deformovaná, což je důsledek především povrchové struktury tyče. Zde je nutné hodnotící software vyvinout s odpovídající „inteligencí“, která umožní rozeznat tyto opticky deformované vady tak, aby nedošlo ke zbytečně přísnému vyřazení výrobků z důvodu nízké jakosti.



Obr. 6.9 Tyč s různými typy vad, nafocená ze čtyř stran při stejných světelných podmínkách a nastavení kamery



Obr. 6.10 Zvětšení vad z Obr. 6.9

Jako vhodný princip se jeví stávající prosvětlení tyčí z boku (prosvětlení z místa lomu). Prosvětlení tyčí se jeví jako vhodnější také s ohledem na současné hodnocení jakosti, tedy obraz získaný kamerou je podobný tomu co vidí lidské oko v současné podobě testu. Při testech je nutné tyčí otáčet, čímž je možné získat přesné rozmístění vad v tyči v souřadnicích x , y , z . Stačí teoreticky pouze snímkování tyče ze dvou stran a je tak možné získat 3D model rozložení vad uvnitř tyče. Proti této myšlence jde ale zmíněná povrchová struktura bočních stran a spodní strany.

Okrajové podmínky pro vyvíjené zařízení lze stanovit takto:

- 1) Hodnocení musí být prováděno v uzavřeném boxu. Jakékoliv vnější světlo způsobuje optické efekty, které mohou být chybně vyhodnocovány jako vady. Vnitřní prostor musí být opatřen černým difúzním povrchem (aby nedocházelo k odrazům od stěn zařízení), světelný zdroj by měl být tzv. studený (aby nedocházelo k prohřívání prostoru, pravděpodobně LED osvětlení).
- 2) Tyče musí být umístěny na polohovacích vidlicích, které umožní snímání minimálně 2 stran, ideálně všech 4 stran. Vidlice musí být konstruovány tak, aby neovlivňovaly obraz tyče.
- 3) Rozlišení kamery – současné rozlišení kamery 5 Mpx umožňuje detekovat vcelku malé vady a jeví se jako postačující.
- 4) Objektivy – je vhodné použít kvalitních objektivů s větší ohniskovou vzdáleností než 5 mm. U použitého objektivu (ohnisková vzdálenost 5 mm) se již začínalo projevovat zkreslení (ohyb) obrazu. Proti tomuto požadavku jde kompaktnost zařízení a jeho velikost. Kamery s objektivem s větší ohniskovou vzdáleností je nutné umístit výše, aby byla zabráněna celá délka tyče. Další možností je použití dvou kamer, což ale zhruba ztrojnásobí cenu systému pro snímání a interpretaci obrazových dat.
- 5) Barevné rozlišení kamery – barevné kamery jsou dražší a mají větší zkreslení způsobené Bayerovou maskou a následným dopočítáváním každého pixelu. Na druhou stranu dokážou rozlišit vady jako je rez na povrchu tyče. Na základě dlouhodobých experimentů (zahrnujících všechny typy vad) je možné zvážit, zda bude vhodnější použití černobílé kamery.
- 6) Manipulace s tyčí, umístění tyče do testovacího zařízení, rychlost kamery, přenos dat, rychlost zpracování obrazu a vyhodnocení jakosti a další – v současné době je takt výroby od 26 do 65 s na jednu tyč (podle průměru tyče, větší průměr znamená prodloužení doby výroby). Takt pro malé průměry tyčí je vysoký a je nutné uvažovat i o zdvojení zařízení.
- 7) Barevná stálost a transparence testovaných tyčí. Je nutné zajistit stále stejné podmínky, včetně barevné stálosti tyčí. V případě změny transparence a barevnosti tyče je nutné provést nové nastavení systému (především prahů pro převod na binární snímek, změna nastavení clony objektivu, ...).
- 8) Jednoznačné rozlišení vad – je dáno především dlouhodobými experimenty na mnoha výrobcích s cílem získat celou škálu vad.

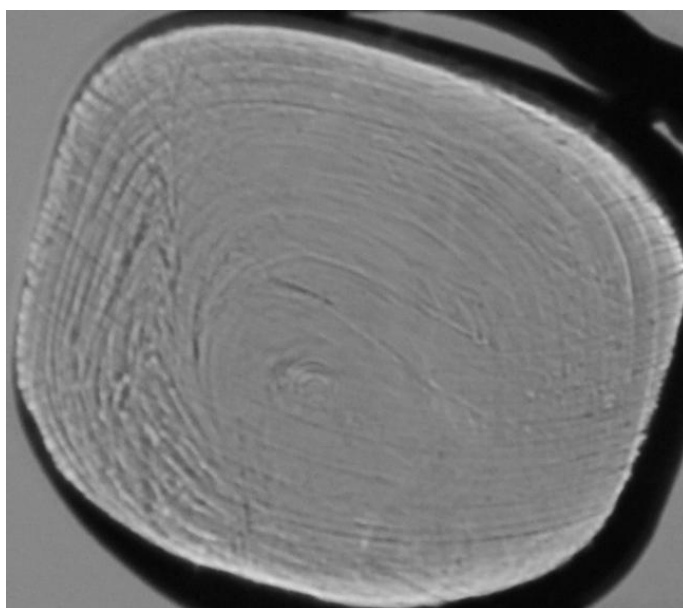
Hlavní úskalí vývoje zařízení lze shrnout do těchto bodů:

- a) Nutno vyvinout software schopný odlišit optickou deformaci vyvolanou povrchem tyče od skutečného tvaru vady.
- b) Vyřešit relativní posun vad při otočení tyče vlivem optických efektů.
- c) Stanovení vhodných prahů pro započítání vad do jakosti, možná změna na hodnocení četnosti.
- d) Vyvinout a optimalizovat software pro vyhodnocení tvaru vad.
- e) Vidlice pro uložení a otočení tyče musí zajistit přesné otočení tyčí a neovlivnit získaný obraz snímačem.
- f) Dostatečná robustnost zařízení.

Zařízení nebylo dále vyvíjeno, neboť náklady na automatickou manipulaci a následné hodnocení jakosti by byly vysoké. Úspory mzdy operátora by v současné době neumožnily návratnost v dostatečně krátké době. Nicméně, vzhledem k trendu zvyšování mezd, nedostatku zaměstnanců a naplňování konceptu Průmyslu 4.0, může být uplatnění objektivní automatické kontroly v budoucnu v této oblasti rentabilní.

6.2.4 Vznik šlír ve skle

Šlíry jsou skelné nehomogenity ve skle, které mohou mít různé mechanismy vzniku, ale mají podobný optický projev. Jedna z definic šlír je: *Šlíra ve skelném předmětu je malá skelná inkluze, jež má optické a jiné vlastnosti odlišné od mateřského (okolního) skla*, [146]. Ze své podstaty skla se jedná o difúzní vrstvy nebo hraniční vrstvy, které se mohou jevit jako velmi ostrá rozhraní (optické „nehomogenity“), Obr. 6.11. Projevem těchto rozhraní je změna indexu lomu, který je definován gradientem indexu lomu. Gradient indexu lomu o velikosti 10^{-5} mm^{-1} je již viditelný lidským okem, ale v případě optických výrobků může (vzhledem k charakteru jejich použití) zhoršovat jejich vlastnosti i při nižší velikosti.



Obr. 6.11 Ukázka šlír v mačkárenské tyči

Šlíry se mohou od okolního skla lišit buď:

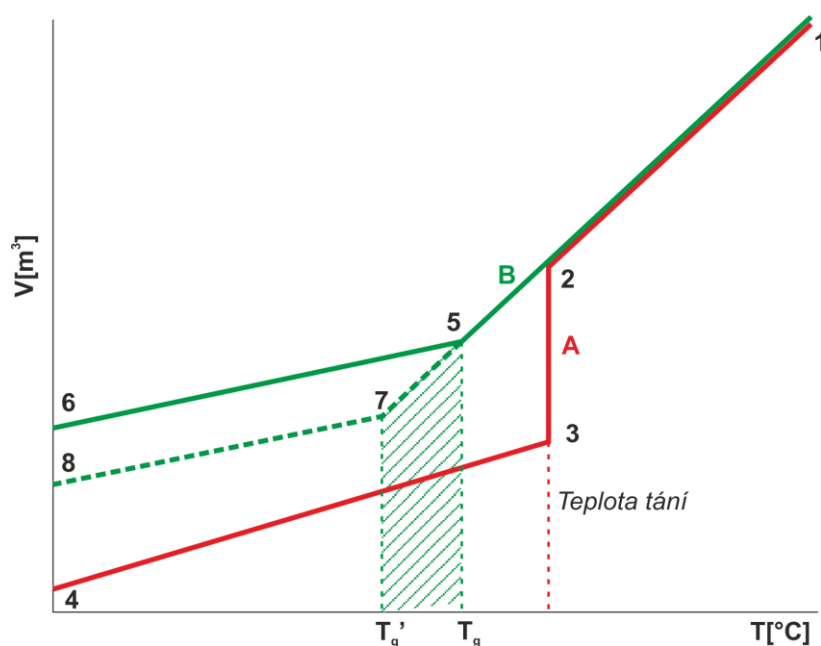
- jiným chemickým složením,
- rozdílnou tepelnou minulostí nebo
- jiným strukturním uspořádáním.

V případě chemického složení může být důvodem jejich vzniku relativně mnoho příčin [146]:

- špatné promísení a homogenita kmene nebo jeho špatná granulometrie,
- produkty koroze žáruvzdorných materiálů, ze kterých je postaven tavicí agregát (z vany a klenby),
- neprotavení surovin, především sklářského písku,
- vznik vrstevnaté skloviny, což je důsledek tékání některých složek, a případně vycezování kmene (stékání snadno tavitelných složek kmene ke dnu),
- kolísání teploty v tavicím agregátu – teplejší sklovina koroduje více materiál vyzdívky a po snížení teploty na požadovanou hodnotu již není umožněna dostatečná homogenizace skloviny vzhledem k její viskozitě,
- vliv uvolňování těžších produktů ze dna vany – všechny cizí materiály, produkty koroze a redukčních pochodů v tavicím agregátu, které jsou těžší než tavená sklovina, se usazují na dně vany. Za určitých podmínek (zvýšení odběru, generováním bublin ze dna) může dojít k jejich odplavení a nehomogennímu ovlivnění chemického složení skloviny.

Uvádí se, že změna chemického složení skla přibližně o 0,1 % hm. způsobuje okem viditelné šlíry (gradient indexu lomu 10^{-5} mm^{-1}). Podle Dvořáka [149] je při pohledu proti vhodně strukturovanému pozadí (v imerzi) postřehnutelná změna indexu lomu dokonce 10^{-6} mm^{-1} , což odpovídá odchylce 0,003 % ZrO_2 nebo 0,025 % SiO_2 nebo 0,1 % Al_2O_3 . Znamená to, že chemická analýza optických nehomogenit je obecně velmi obtížným způsobem jejich diagnostiky. Tyto šlíry s rozdílným chemickým složením představují hlavní problém polooptických/optických tyčí, neboť po finálním přetvarování do výrobku v něm zůstávají.

U tepelných šlír je mechanismus jejich vzniku odlišný. Při ochlazování skloviny „pod teplotu tání“ nedochází ke krystalizaci a tedy ke skokové změně objemu jako u krystalických látek (Obr. 6.12, body 1-2), ale sklovina se dále ochlazuje a vzniká přechlazená kapalina (Obr. 6.12, body 2-5). Její objem klesá s teplotou po stejné křivce jako u skloviny. Teprve po značném podchlazení dojde k transformaci (Obr. 6.12, bod 5), sklovina ztuhne ve sklo, jehož objem (ale dále i hustota, index lomu atd.) se bude měnit s teplotou podle jiné křivky (Obr. 6.12, body 5-6). Pokud bude sklo ochlazováno pomaleji, k transformaci dojde až později (Obr. 6.12, bod 7), struktura skla má menší objem, tedy vyšší hustotu a tím i index lomu. Index lomu skla tak nezávisí jen na složení skla, ale i na jeho tepelné historii. Tepelné šlíry mohou vznikat pouze v blízkosti transformačního intervalu (10^{11} až 10^{14} Pas), pokud jsou jednotlivé části skloviny ochlazovány rozdílnými rychlostmi.



Obr. 6.12 Schematické znázornění změny objemu s teplotou: A – tuhnutí s krystalizací (1-2-3-4), B – skelné tuhnutí: pomalé ochlazování (1-5-7-8), rychlé ochlazování (1-5-6), [13]

V případě uvedené výroby mačkárenských tyčí pro optiku/polooptiku je možné předpokládat, že tyto šlíry nebudou mít vliv na kvalitu finálního výrobku, protože tyče jsou ohřívány na teploty s viskozitou pod 10^{10} Pas tak, aby mohly být dále tvarovány. Dá se předpokládat, že transformační interval je překročen v celém objemu tvarované tyče, a tedy k nové transformaci dochází při ochlazování skloviny u vytvarované optiky.

Šlíry zapříčiněné jiným strukturním uspořádáním mohou být způsobeny lokální redukcí nebo oxidací skloviny. V tavicím agregátu tak mohou vznikat barevné šlíry. Tento typ šlíry zůstává i v přetvarovaném finálním výrobku.

Jedním ze základních problémů detekce šlíry v tomto typu polotovaru je jejich rozlišení na chemické, strukturní a tepelné šlíry, a to s ohledem na jejich vliv na finální výrobek.

6.2.5 Detekce šlíry ve skle

Detekce šlíry je v současné době prováděna souhrnně za předchozí den. Provádí se na vzorcích délky okolo 200 mm s broušenými a leštěnými čely, vzorky jsou odebrány každé 3 hodiny. K hodnocení šlíry se používá metoda prostorové filtrace obrazu. Zařízení je složeno z transparentní nádoby s imerzní kapalinou, do které se vkládá konec tyče, osvětlení, optiky (která provádí, mimo jiné, prostorovou filtraci), průmyslové kamery a vyhodnocovacího počítače. Šlíry jsou vyhodnocovány speciálně vyvinutým software. Dalším zařízením je pro provozní testování bez úpravy čela vzorku s jiným software, ale na podobném optickém principu jako zařízení pro tyče s broušenými čely.

Existuje celá řada vyvinutých metod pro detekci šlíry, které jsou používány především v laboratořích. Některé z metod jsou natolik náročné (finančně i technicky), že je možné je

provádět pouze ve specializovaných laboratořích. Vhodná metodika detekce šlír pro dané provozní účely by měla splňovat tyto požadavky:

- detekce šlír v celém objemu vzorku,
- automatická detekce od vložení vzorku po jeho vyjmutí (např. definované otáčení vzorkem),
- minimalizace vlivu obsluhy na výsledek hodnocení (definovaná a případně automatická příprava vzorku),
- spolehlivost,
- cenově dostupná metodika,
- zdravotní nezávadnost, ideálně s vyloučením nebezpečných nebo dráždivých chemikálií v přímém kontaktu s člověkem,
- ideálně rozlišení chemických a tepelných šlír,
- metodika by měla umožnit i přenos do blízkosti výrobní linky.

Metody detekce šlír je možné rozdělit do dvou základních skupin na:

- destruktivní,
- nedestruktivní (vzorek zůstává celý, mechanicky neporušený, ale většinou je třeba ho vhodně upravit).

Destruktivní zkoušky jsou zaměřeny především na chemickou analýzu vzorků. Nevýhodou je jejich velká pracnost, možná expozice obsluhy nebezpečnými látkami a nutnost velmi dobře proškoleného personálu. Na druhou stranu mohou poskytnout cenné údaje o složení vady a jejím potenciálním vzniku. Jsou to například tyto metody [146]:

- **leptání povrchu skla** se šlírami pomocí kyseliny fluorovodíkové, směsi kyseliny fluorovodíkové a kyseliny chlorovodíkové nebo hydroxidu sodného, detekce je možná u šlír, které mají jiné chemické složení,
- indikace šlír jiného složení pomocí **hustoty**, kolísání hustoty indikuje kolísání homogenity. K měření rozdělení hustoty ve vzorku se používá mletí a separace drti skla v těžkých kapalinách,
- **analýza drti po separaci v těžkých kapalinách**, chemický rozbor šlír může následovat po oddělení drti ze šlír.
- **analýza křehkosti skla**. Sklo je podrceno, síťováno a sledováno složení frakcí. Existuje korelace mezi křehkostí a nehomogenitou.

Nedestruktivní zkoušky jsou založeny především na průchodu elektromagnetického záření vzorkem skla. Využíváno je především optické záření ve VIS spektru:

- lom světla na rozhraní šlíra–sklo, optické promítání a hodnocení šlír podle tvaru (např. metoda stínů – shadowgraph method), kap. 6.2.5.2,
- zebra test a použití dalších vzorů pro detekci optické deformace vlivem šlír (kap. 6.2.5.3),
- využití totálního odrazu,
- detekce zbytkového napětí v okolí šlíry (kap. 6.1.1),
- vizualizace šlír prostorovou filtrací,

- zviditelnění šlír pomocí interference a zástinu (metody vyžadují imerzi, stříhové interferometrie pro prošlé světlo, interferometrie použitím Mach–Zehnderova interferometru s laserovým zdrojem),
- určení změny indexu lomu v imerzní kapalině za použití Abbé–Zeissova refraktometru,
- určení gradientu indexu lomu z pohyblivého terče pod vzorkem,
- detekce Beckeho linky,
- holografická interferometrie a stříhová holografická interferometrie (kap. 4.4.9),
- a další.

Na základě již uvedené analýzy v kap. 6.1 lze šlíry detekovat ve VIS, IR záření, teoreticky v UV záření, pomocí rentgenového brzdného záření, ultrazvuku a teoreticky pomocí elektrické impedanční tomografie při dávkování skloviny.

6.2.5.1 Detekce šlír ve viditelném spektru

Na **detekci šlír ve VIS spektru** je založena většina běžně uváděných metod, což je logicky dáno užitím vyráběné optiky v tomto spektru. V rámci experimentů byly vyzkoušeny metody na konkrétním vzorku:

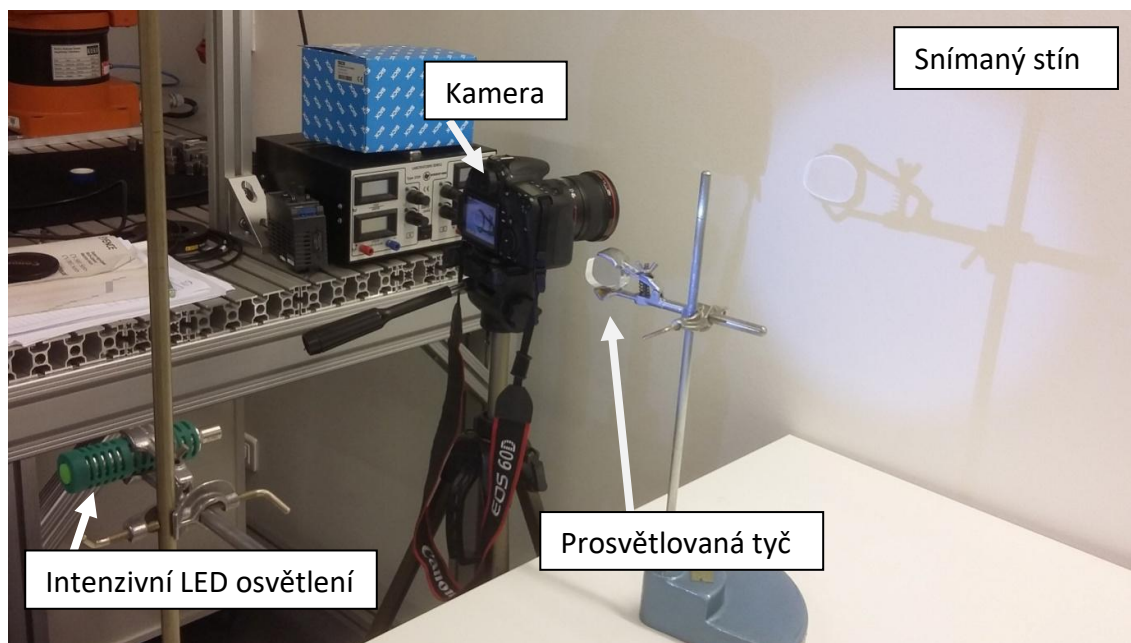
- lom světla na rozhraní šlíra–sklo,
- zebra test a použití dalších vzorů pro detekci optické deformace vlivem šlír.

Byla také testována možnost detekce zbytkového napětí v okolí šlíry. Tento přístup není u daného typu polotovarů příliš reálný, protože napětí v tyčích je přítomno i bez šlír, a to ve vcelku vysoké hodnotě. Vysoké hodnoty napětí nebrání dalšímu zpracování, tedy přetvarování tyče.

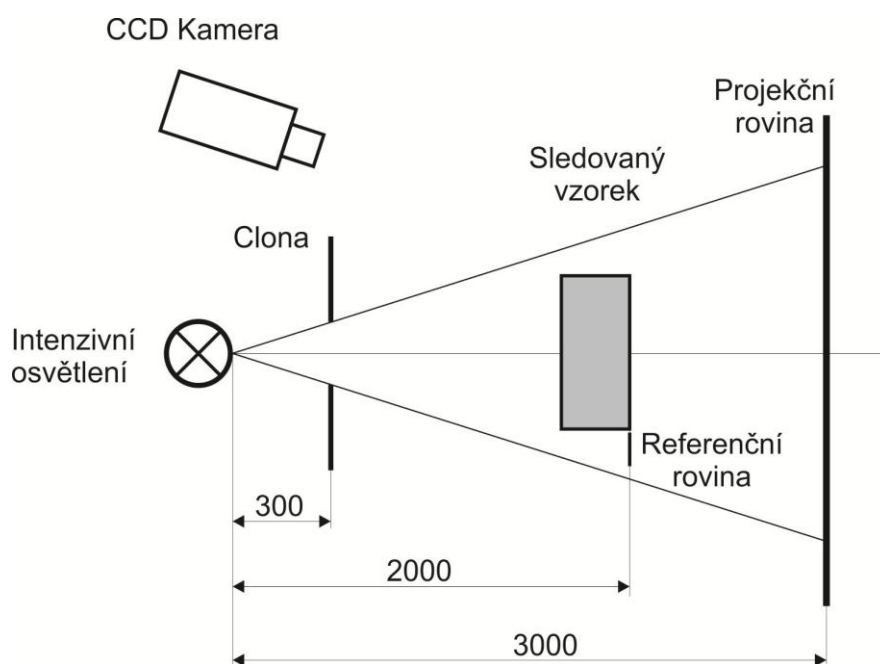
Obě uvedené metody vyžadují broušený a leštěný vzorek a do vzorku je nahlíženo právě přes broušené a leštěné čelo. To je jistě nevýhodou, ale obě metody již nepotřebují imerzní kapalinu. V každém případě by bylo třeba dlouhodobě porovnat výsledky metod se současně používanou metodou za použití imerzní kapaliny.

6.2.5.2 Lom světla na rozhraní šlíra–sklo

Metoda je založena na osvětlení vzorku silným bodovým světlem. Světlo prochází vzorkem a vlivem rozdílného lomu na rozhraní vad dochází k jejich zviditelnění, Obr. 6.13. Ověřené nastavení pro stanovení šlírovitosti skla ve firmě SCHOTT je v [150] uvedeno na Obr. 6.14.



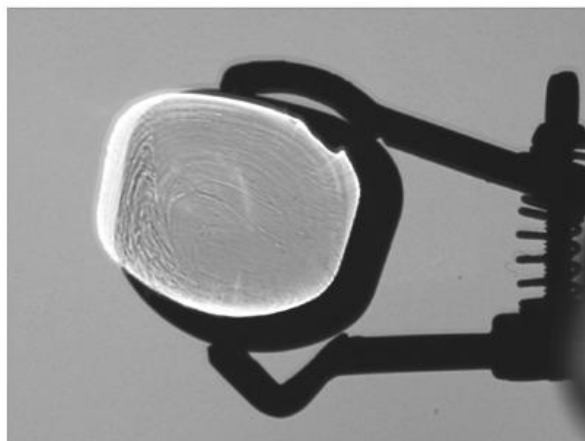
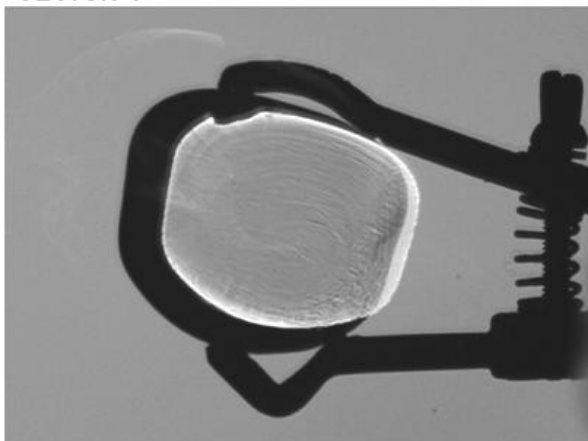
Obr. 6.13 Měření pomocí metody stínů



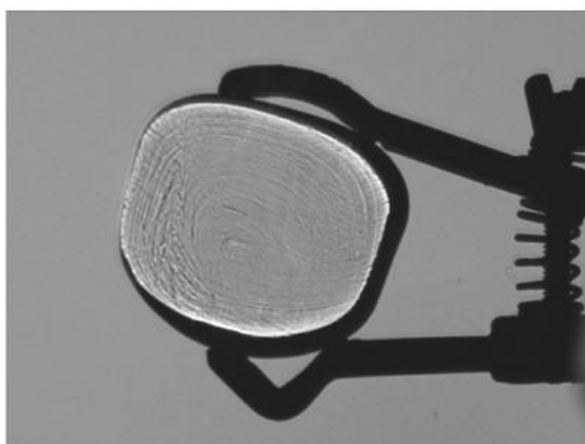
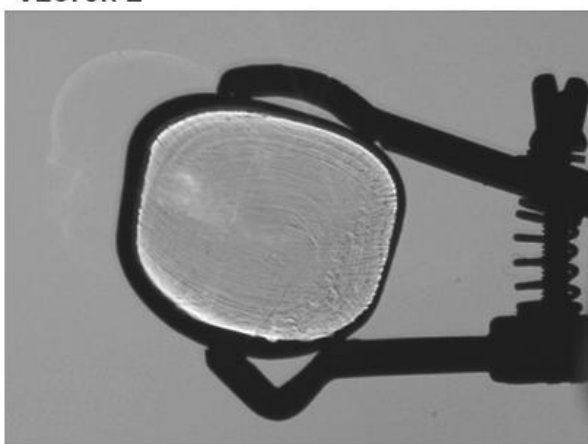
Obr. 6.14 Uspořádání metody použité ve firmě SCHOTT

Vzorek musí být planoparalelně broušený a následně leštěný, vrypy způsobené nedokonalým broušením jsou následně viditelné, Obr. 6.15 (na obrázcích jsou vidět jako příčné mírně prohnuté vrypy).

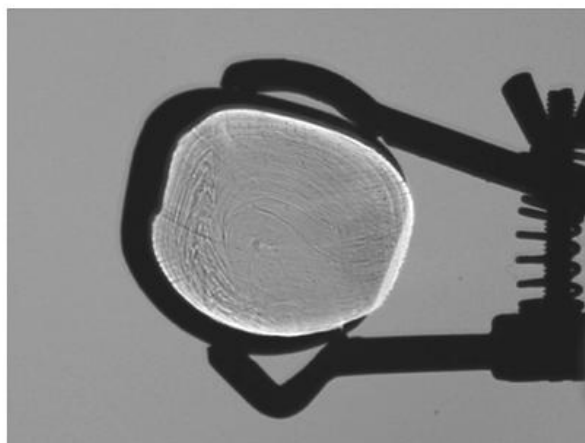
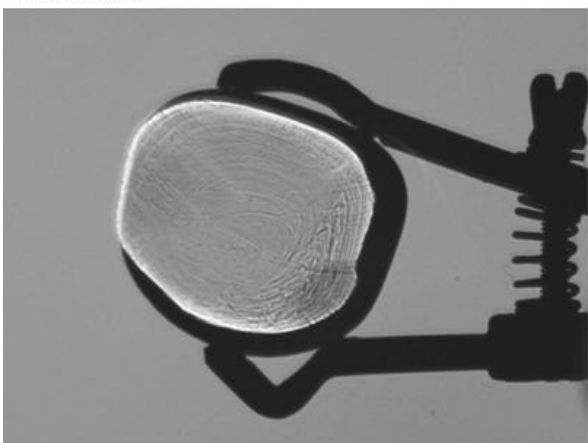
Vzorek 1



Vzorek 2



Vzorek 3



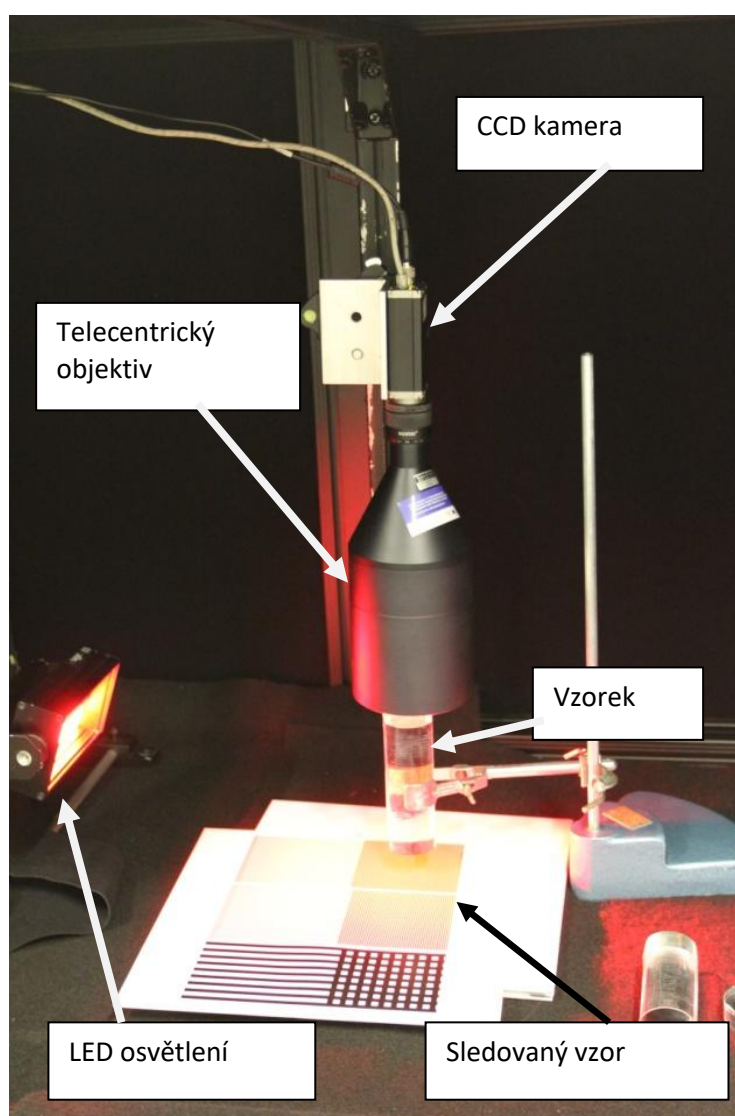
Obr. 6.15 Ukázky výsledků použití metody stínů

Uvedená metoda je jednou z nejběžněji používaných metod v praxi pro kontrolu optických bloků (např. firmou SCHOTT). Metoda má přesně dané podmínky, které nebyly v tomto prvotním testu dodrženy (vzdálenosti, kvalita osvětlení, pozice snímáče/fotoaparátu). Přesto výsledky dokládají použitelnost metody pro nasazení v praxi. Vedle uvedených vzdáleností je třeba u vzorků zajistit kvalitní broušení a leštění. Vzorky mohou být pro tuto metodiku jen tenké (v experimentu byly použity vzorky tloušťky okolo 20

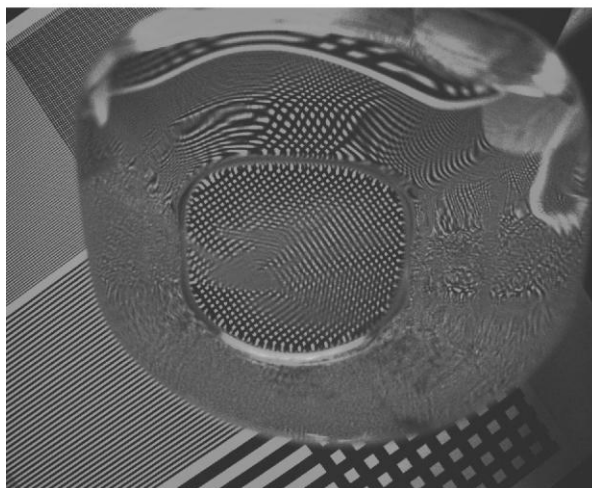
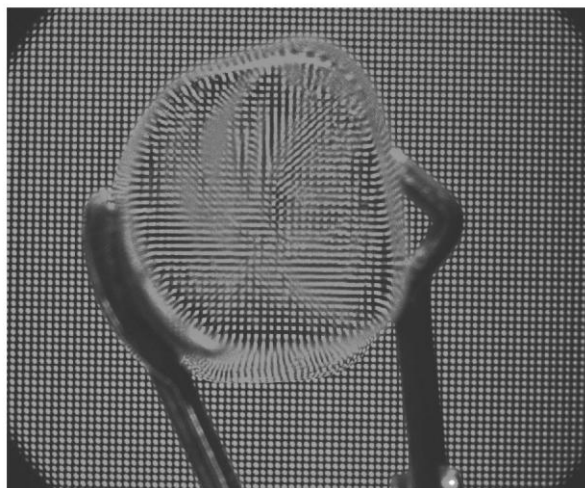
mm), protože silnější již představují spleť šlír, které jsou prakticky obtížně zobrazitelné. U této metodiky je vhodné použít telecentrický objektiv, kap. 3.1.7.3.

6.2.5.3 Zebra test a použití dalších vzorů

Metoda využívá optických deformací způsobených změnou indexu lomu na rozhraní mateřského skla a šlír. Experiment byl založen na průchodu světla odraženého od vhodného odrazového vzoru tyčí a detekci prošlého deformovaného obrazu vzoru tyčí pomocí průmyslové kamery. Uspořádání experimentu je na Obr. 6.16. Při experimentu byl použit běžný objektiv, ve kterém se ovšem projevuje perspektiva (Obr. 6.17), která znemožňuje spolehlivou detekci vad na okrajích. Proto byl použit telecentrický objektiv (Obr. 6.17), který umožnil detekci vad i při okrajích tyčí (u poskytnutých vzorků, Obr. 6.18).



Obr. 6.16 Experiment s detekcí vad pomocí distorze obrazu

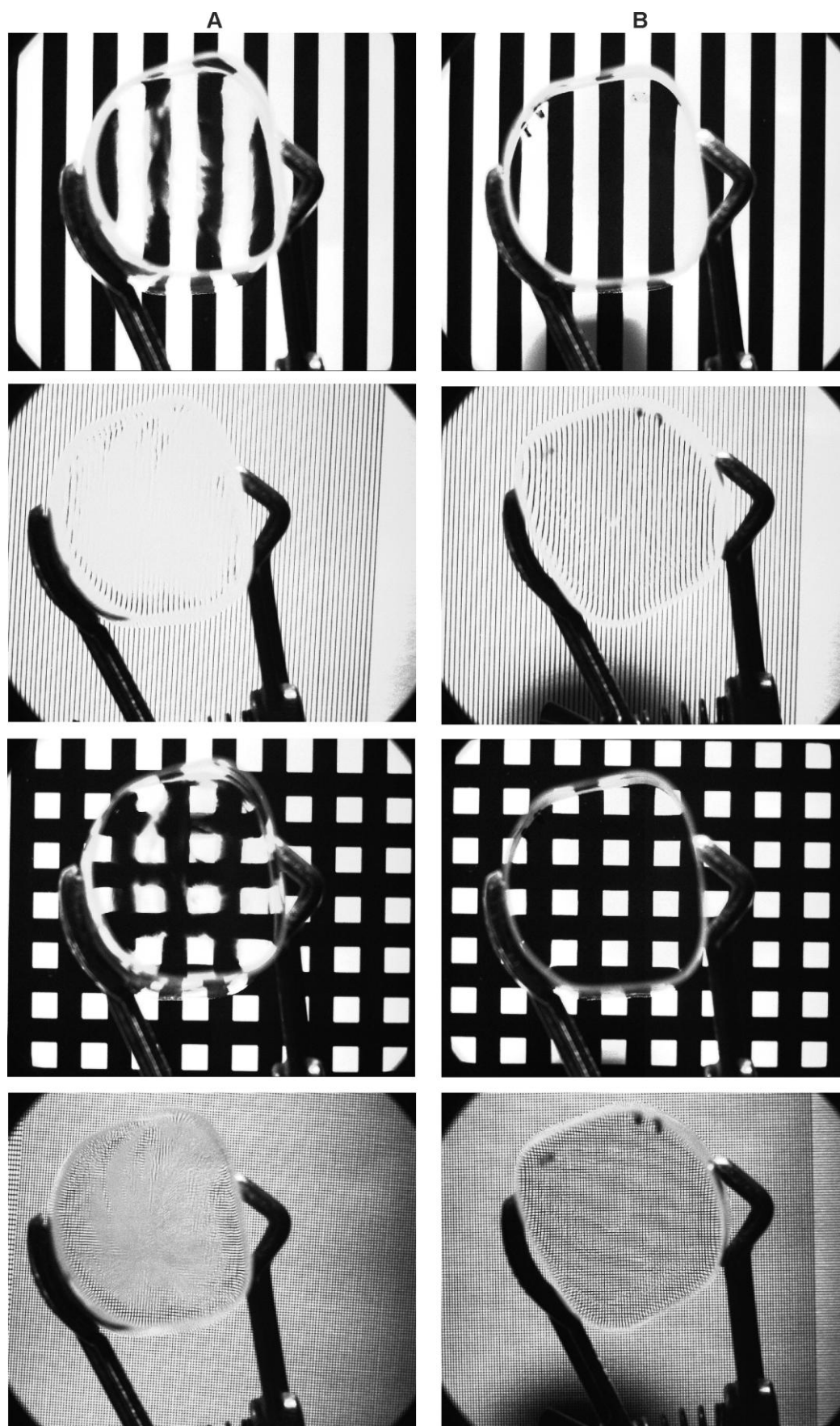
Běžný objektiv**Telecentrický objektiv**

Obr. 6.17 Pozorování vad na základě distorze promítaného obrazu pomocí běžného a telecentrického objektivu

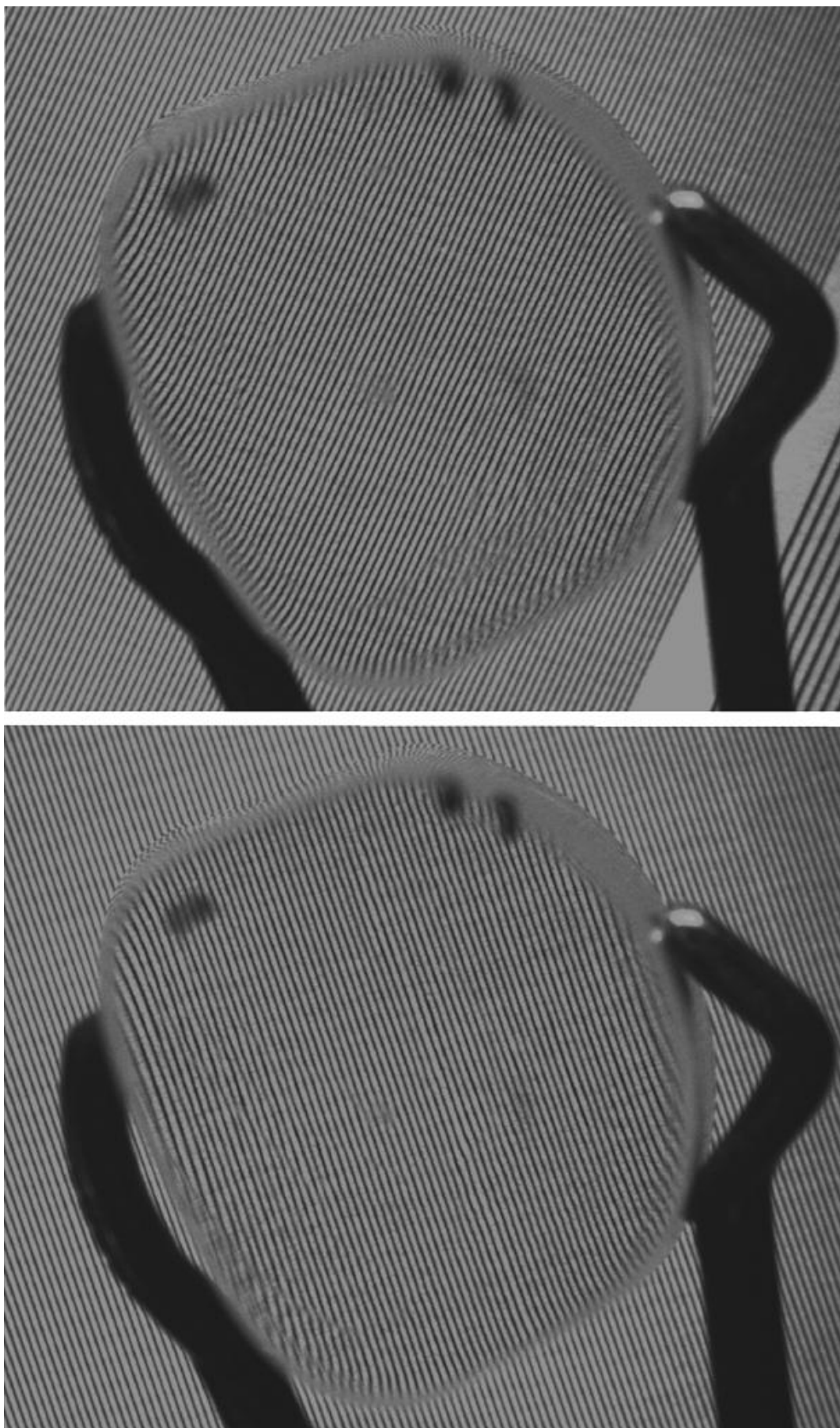
V experimentu byly použity dodané delší tyče (90 až 125 mm), které jsou běžně používány pro detekci v imerzní kapalině. U vzorku A byla uprostřed tyče snadno detekovaná vysoká distorze (Obr. 6.18). Vzhledem k jejímu umístění a charakteru (uspořádání do hvězdice s bohatým členěním) se dá předpokládat, že se jedná o šlíry tepelné. U vzorku B byla detekce šlír komplikovanější a bylo nutné použít jemnější vzor pro spolehlivou detekci, Obr. 6.19 a Obr. 6.20. V tomto případě jsou šlíry pod povrchem tyče a byla také detekována označená vada.

Z experimentu také vyplývá, že záleží na směru použitého vzoru. Pro spolehlivou detekci šlír musí být orientace linky zhruba o 45° vůči vadě. Lze použít i mřížku, ale i přesto bude nutné zajistit otáčení vzorku nebo promítaného vzoru.

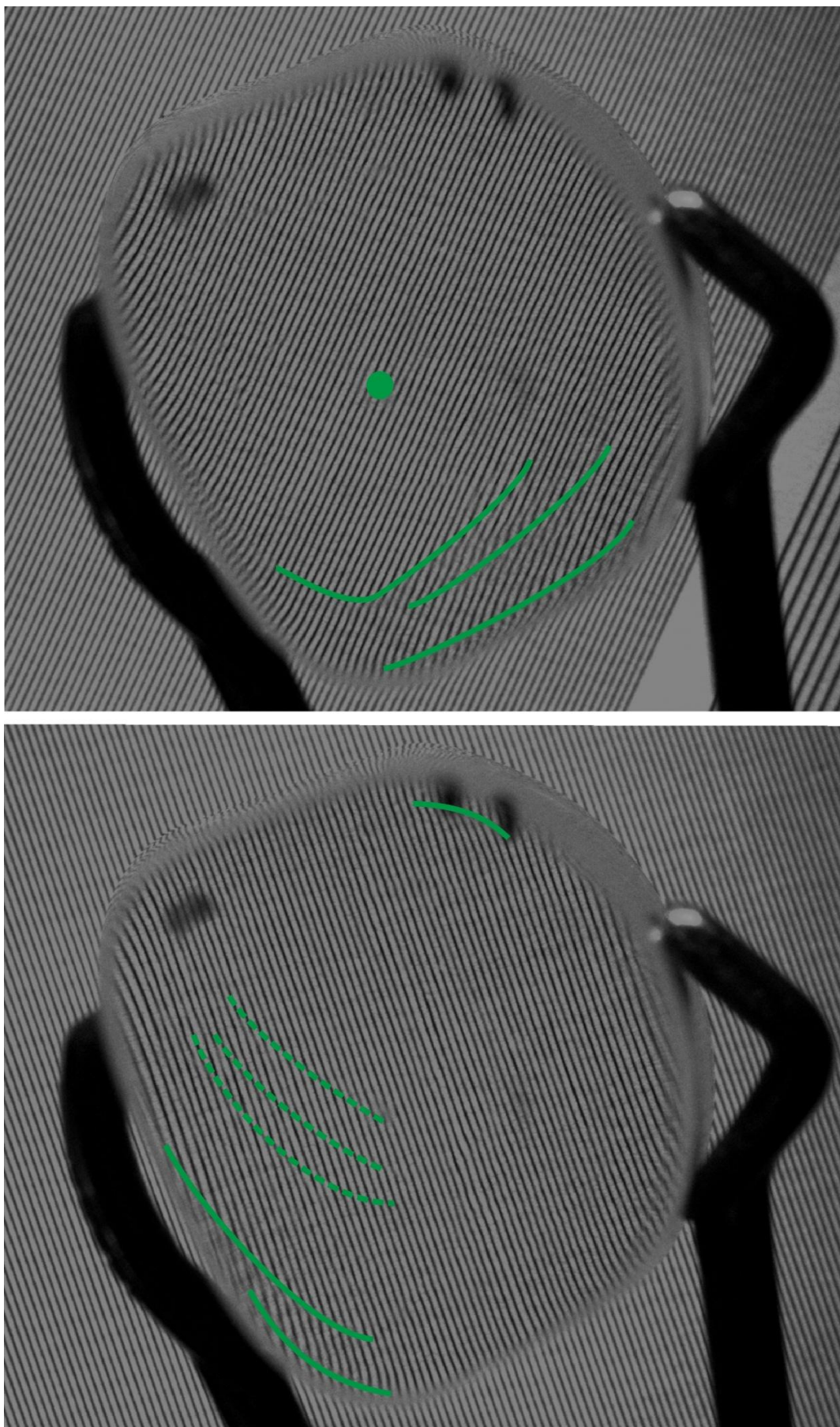
Výhodou této metody je především její cenová dostupnost, předpokládaná spolehlivost pro daný typ šlír, eliminace imerzní kapaliny a možnost automatizace metodiky. Nevýhodou je především nutnost kvalitního broušení a leštění vzorku, který musí mít vždy stejné rozměry. Leštěný povrch musí být bez stop po broušení.



Obr. 6.18 Ukázka pozorování vad na základě distorze promítaného obrazu, telecentrický objektiv, pro vzorky A a B



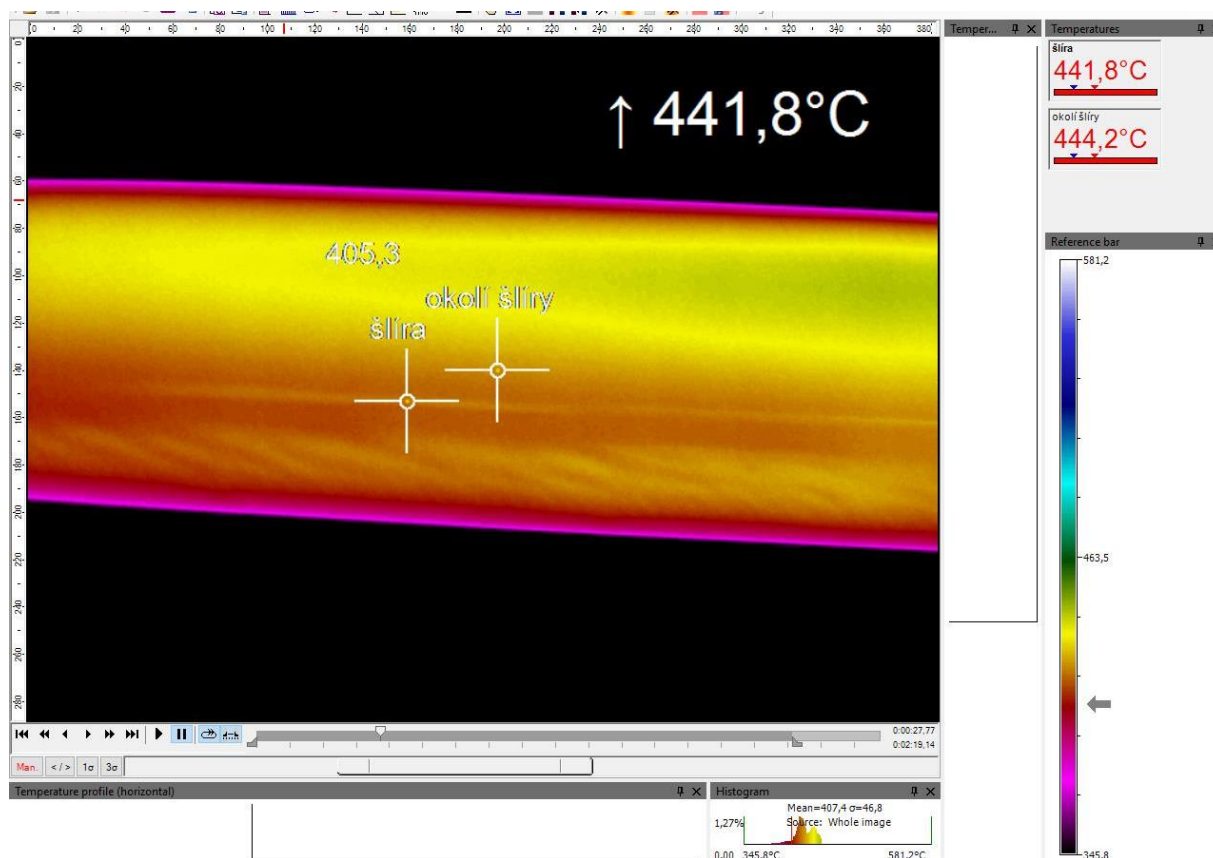
Obr. 6.19 Detekce vad v tyči B



Obr. 6.20 Zvýraznění vad v tyči B

6.2.5.4 Detekce pomocí IR záření

Možnost detekce šlír pomocí termovizních kamer byla již testována s celkově kladným výsledkem [151]. Byly použity dvě kamery firmy Micro-Epsilon thermoIMAGER TIM 200 (spektrální rozsah 7 500 až 13 000 nm – měření povrchu skleněné tyče, rozlišení čipu 160 x 120 pixelů) a thermoIMAGER TIM M1 (spektrální rozsah 920 až 1 100 nm – NIR – měření zhruba 17 mm pod povrchem, rozlišení čipu 764 x 480 pixelů). Proběhly testy na výtoku skloviny z dávkovače (obě kamery) a na samotné tvarované tyči (pouze kamera TIM 200). Na Obr. 6.21 je ukázka termografického snímku s předpokládanou šlírou. Jak se ukazuje, je detekce šlíry na povrchu (nebo těsně pod povrchem) možná, otázkou jsou šlíry v objemu tyče. Na snímcích jsou i další artefakty, které mohou ovlivnit detekci vad, proto je klíčovým problémem zajištění minimalizace ovlivnění měření dalšími vlivy. Pro relevantní závěry by bylo potřeba zajistit minimalizaci vlivu okolí, provést přesnější nastavení rozsahů termovizních kamer, použít kameru s vyšším rozlišením, pokusit se nasnímat tyč z více stran, zajistit chlazení kamery a její pevné upevnění (bez vibrací) ve vhodné poloze a vzdálenosti atd. Nutností je také ověření, zda jsou detekovány šlíry různého chemického složení, strukturní nebo jen šlíry tepelné, které nemají tak zásadní vliv na kvalitu (jak bylo uvedeno v kap. 6.2.4).



Obr. 6.21 Termografický snímek mačkárenské tyče s označenou předpokládanou šířou, termokamera thermoIMAGER TIM 200, [151]

Využití uvedeného principu detekce by bylo vhodným řešením vzhledem k možnému nasazení přímo na linku, bez nutnosti úpravy vzorků (broušení a leštění) a s možností okamžitě reagovat na vzniklou šlíru.

6.2.5.5 Detekce pomocí UV záření

Využití rozdílné absorpce mateřského skla a šlír v UVB záření je teoreticky možné. Se změnou složení se mění i absorpce skla v UVB oblasti. Teoreticky by se změnou vlnové délky bylo možné pomocí UVA + UVB kamery detekovat změny ve složení. Testy by se měly provádět na studené tyči.

Teoreticky by bylo možné detekci provádět přímo na lince v průběhu výroby, bez nutnosti broušení a leštění vzorků, jednalo by se o rychlou detekci a lze předpokládat příznivější cenu zařízení proti použití rentgenového elektromagnetického záření. Otázkou je přesné určení polohy a velikosti šlír a projev tepelných šlír.

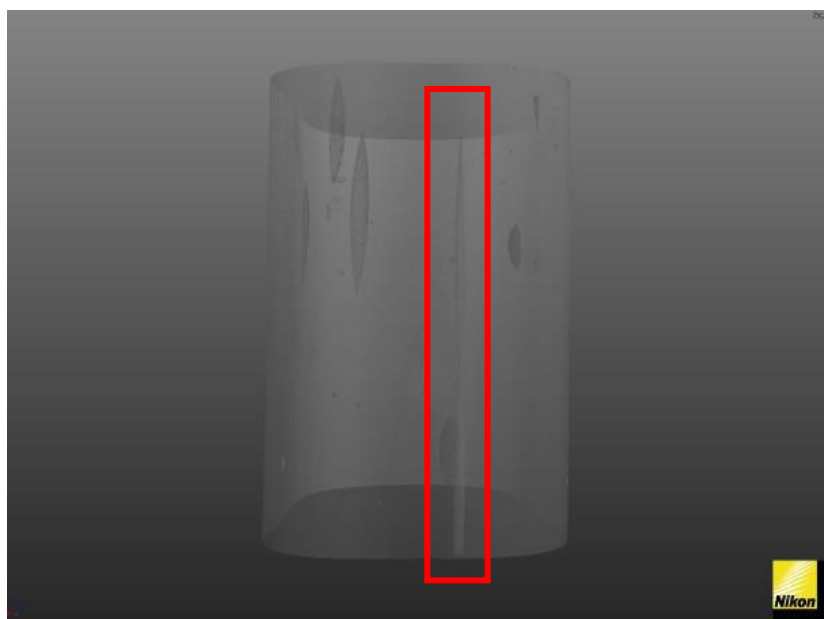
Naopak jednoznačnou nevýhodou je nutnost základního výzkumu, osvětlovač schopný kontinuální změny vlnové délky v UVB záření v malých krocích (případně více osvětlovačů), dále vliv UVB záření na zdravotní problematiku v okolí, atd.

6.2.5.6 Detekce pomocí rentgenového brzdového záření

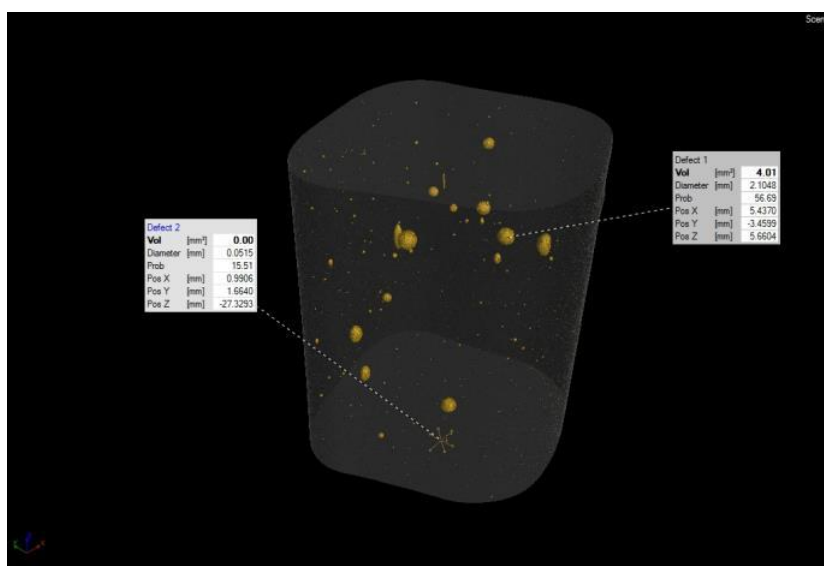
Detekce vad v tyčích byla také zkoušena pomocí rentgenového brzdového záření [152]. Použito bylo zařízení firmy NIKON s označením XTH 225 ST, zdroj brzdového záření je 225 kV, detektor PE 1621 EHS s rozlišením 2 000 x 2 000 pixelů (4 Mpx) s datovou hloubkou 16 bitů. Testovány byly jak tyče transparentní bezbarvé, tak i tyč transparentní sytě modrá a červená opakní (neprůhledná),

Výhodou této metody detekce je jednoznačně možnost sledovat vady jak u tmavých transparentních barev, tak i u tyčí pro viditelné záření neprůhledných. Pokud je rozlišení chápáno jako rozlišení vzorku do 50 x 50 x 50 mm, pak se lze u běžných vzorků dostat pod rozlišení 0,1 mm (velikost pixelu pak odpovídá 0,025 mm, nejmenší teoreticky detekovatelný rozměr je pak 0,05 mm). Jak ukázalo první měření, pak šlíry jiného chemického složení jsou detekovatelné (Obr. 6.22), lze také odlišit kaménky a bublinky v opakní mačkárenské tyči Obr. 6.23.

Nevýhodou je především dlouhá doba detekce vzorků. Jak je v poskytnuté zprávě od výrobce konstatováno, malé vzorky délky několika desítek mm jsou detekovatelné v rozsahu 30 minut až 3 hodin, celá tyč (což by pro detekci šlír nebylo třeba) je na celý den. Otázkou je dále nakládání se vzorky po měření (jsou ozářené, probíhá v nich solarizace a nemohou být následně použity), detekování tenkých šlír a skutečné rozlišení typů šlír. Důležitá je finanční rentabilita tohoto relativně drahého zařízení použitého na kontrolu relativně levných výrobků.



Obr. 6.22 Zobrazení 3D výsledku rentgenového skenování transparentní mačkárenské tyče s vyznačením podpovrchové šlíry, [152]



Obr. 6.23 Zobrazení 3D výsledku rentgenového skenování opakní (neprůhledné) mačkárenské tyče se zobrazením velikosti a pozice bublinek a kaménků, [152]

6.2.5.7 Detekce pomocí ultrazvuku

Využití ultrazvuku bylo také v minulosti prověřeno, kdy byl ultrazvuk používán pro detekci velkých vad (od 1 mm) v barevných ručně vyráběných tyčích. Zde měl své opodstatnění, neboť tyče nebyly průhledné. Použití ultrazvuku bylo také testováno u transparentních mačkárenských tyčí. Výsledkem byla možná detekce vad typu bublinek a kaménků nad 0,3 mm (s novějším vybavením by se pravděpodobně rozlišení zlepšilo), šlíry se nepodařilo detekovat vůbec. Další nevýhodou je nutnost měření přes přenosové médium, jako je voda (ponoření tyče do vody) nebo přes vazelínu (tyč musí být potřená vazelínou). Problematická je také detekce na hranách tyče.

6.2.5.8 Detekce pomocí elektronového mikroskopu

Teoreticky možný je princip naleptání leštěného povrchu skla vhodným roztokem a následnou detekcí pomocí SEM rozdílného naleptání povrchu skla. Při správném postupu a vhodně zvoleném roztoku může být rozdíl v naleptání skla tvořící šlíry jiného složení a skla bez šlíry. Pro účely provozní laboratoře se jedná spíše jen o teoretickou možnost vzhledem k pracnosti a nákladnosti metodiky.

6.2.5.9 Závěr kapitoly

Detekce vad uvnitř a na povrchu výrobků ze skla byla prezentována na specifické problematice optické čistoty mačkárenských tyčí. Vady, jako jsou kaménky a bublinky, je možné detekovat pomocí pohyblivého liniového laseru, který provádí „světelný řez“ tyčí. Pokud narazí na vadu, ta je vlivem odrazu na povrchu vady „rozsvícena“. Podobně funguje prosvětlování tyčí, které umožňuje i snadnější detekci povrchových vad. Detekce šlír je podstatně složitější a v rámci výzkumu bylo doporučeno několik možností ve VIS. Jedná se o metodu stínů a také o metodu deformace obrazu geometrického vzoru, který tyčí projde. Prokázalo se, že uvedené metody pro VIS jsou spolehlivé a umožňují případnou kvantifikaci míry zastoupení vad a minimálně u kamének a bublinek také jejich vzájemné rozlišení. Tyto výsledky jsou obecně přenositelné na uvedené vady v dalších výrobcích ze skla.

Byly také zmíněny možnosti metod mimo VIS, také UV, IR, rentgen a ultrazvuk. Metody jsou teoreticky použitelné, ale výhody jejich použití by musely být více zkoumány a jednotlivé metody dovedeny k průmyslovému nasazení.

6.3 Příklad aplikace: detekce vytékajícího proužku skloviny

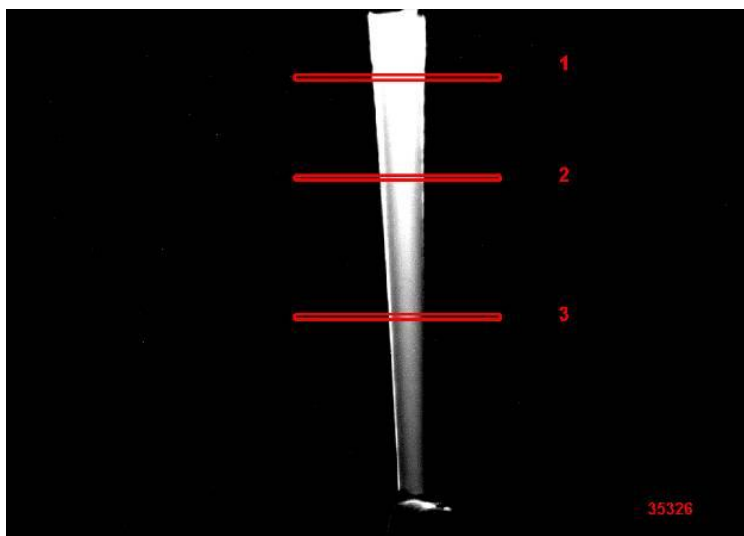
Výtok proužku skloviny je používán (mimo jiné) k dávkování rotačních mačkadel [13, 147]. U výtoku tenkého proužku skloviny se významně projevuje tzv. pulzace a tzv. makropulzace. Pulzace je změna průměru proužku v průběhu času. Makropulzace způsobuje vážné problémy při výrobě – významné zvětšení průměru proužku, které vede až k odstavení výroby. Předpokládá se, že dochází k ochlazení vnějšího povrchu skloviny, která má tak vyšší viskozitu a postupně se z povrchu vytváří „vak“, do kterého sklovina stále proudí a po překročení sil povrchového napětí dojde k utržení vaku. Oba typy pulzace se projevují i u větších průměrů proužku (větších výrobků), ale pulzace mají stejnou výchylku, takže tyto pulzace jsou poměrově u většího průměru výtoku menší a tvarování příliš neovlivňují.

Předpokládá se, že vliv na pulzaci mají: viskozita skloviny (s ní svázaná teplota), průměr výtoku (výtokové misky), odběr skloviny, teplotní gradient (vyšší teplotní rozdíly mezi hladinou nad výtokem a na výtoku způsobují významnější pulzaci), další vlivy shrnuté pod pojem „šum“ (např. chvění „podia“ na kterém jsou stroje, změna teploty okolí v důsledku změn počasí, ...). V tomto případě může docházet ke skládání několika vlivů s různou frekvencí a intenzitou.

Cílem práce bylo krátkodobé (minutové) až střednědobé (3 dny) monitorování výtoku skloviny pomocí obrazové analýzy s ověřením možností přiřazení dat z termočlánků. Pro tyto účely bylo nutné zkonstruovat zařízení (hardware) odolné vůči nepříznivým podmínkám, které jsou v místě monitorování a vyvinout software pro analýzu.

Detekce je založena na spontánní emisi skloviny díky její zvýšené teplotě. Proužek skloviny tak svítí ve VIS a vůči tmavému okolí je dobře detekovatelný. Šířka proužku byla měřena na třech místech, jak je zobrazeno na jednom ze snímků, Obr. 6.24.

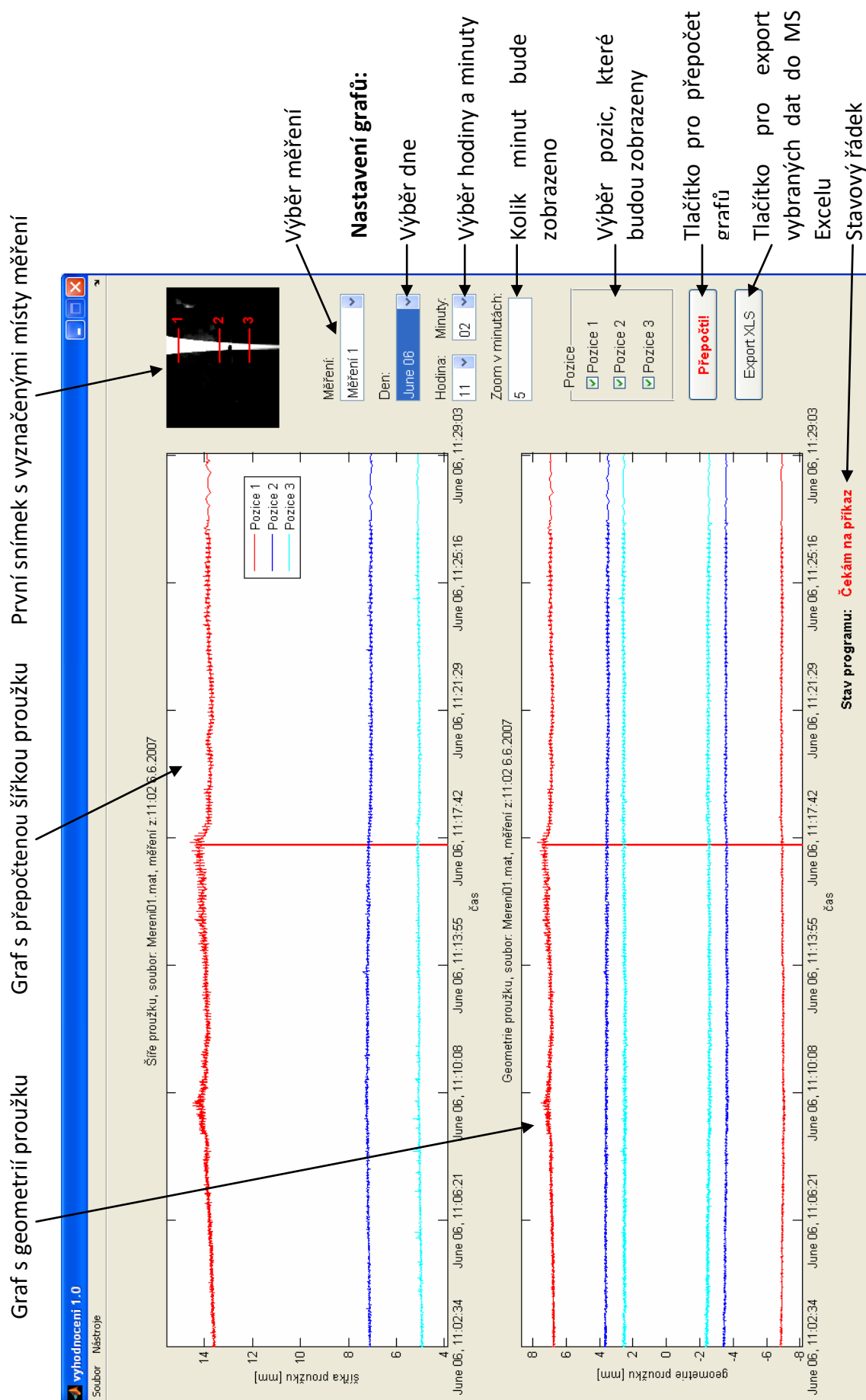
Byl také vyvinut software pro následné vyhodnocení šířky proužku skloviny ve zvolených časech, Obr. 6.25. Na základě přiřazení změřených teplot bylo následně možné určit vlivy změny teploty na pulzaci a navrhnout tak možné zásahy k eliminaci pulzů.



Obr. 6.24 Okno zobrazené při měření s vyznačením tří pozic měřících šířku proužku skloviny

6.4 Příklad aplikace: detekce „membránového napětí“ v automobilovém skle

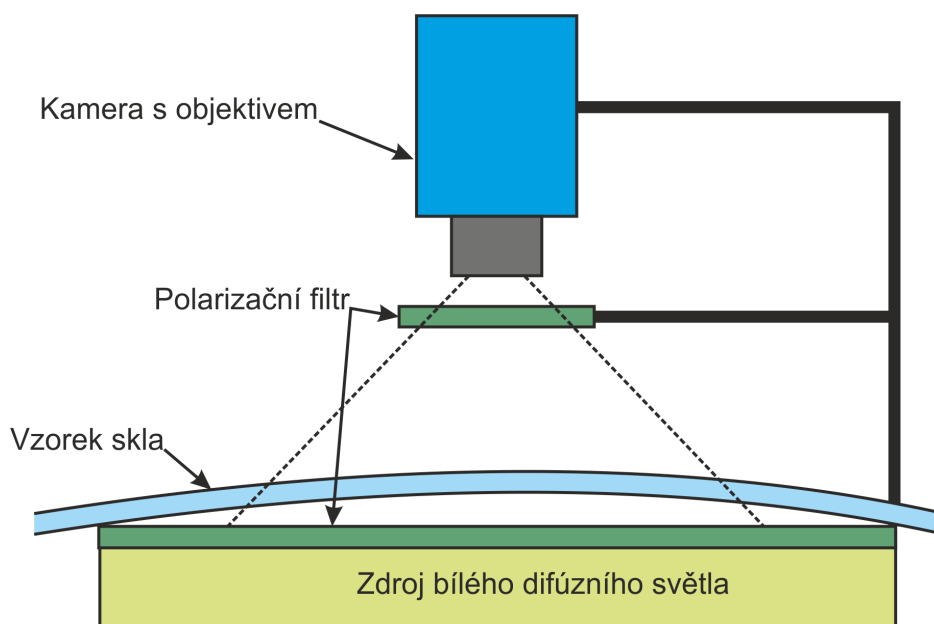
Standardně se u plochého skla uvažuje pouze regulérní trvalé vnitřní napětí (způsobené chladnutím skla), které je proměnné napříč tloušťkou přířezu a je úměrné rychlosti ochlazování skla. (Trvalé vnitřní napětí je přítomno ve všech běžných výrobcích ze skla.) Ovšem mimo to se může u výrobků ze skla velké plochy a zároveň malé tloušťky vyskytovat ještě napětí, jehož velikost je proměnná napříč šířkou skla nebo podél okraje. Toto napětí, které je navrstveno na regulérní trvalé napětí, se označuje jako napětí membránové.



Obr. 6.25 Okno programu pro zobrazení získaných dat šířky proužku v čase

Vznik regulérního trvalého vnitřního napětí je způsoben viskózním tokem při teplotách okolo transformačního bodu (v tzv. chladicím intervalu, čemuž odpovídá viskozita 10^{12} až $10^{13,5}$ Pas). Výrobek se již při této viskozitě nedeformuje, ale rozdíly v objemu, způsobené různou teplotou (teplotním gradientem), jsou vykompenzovány viskózním tokem. Pokud je zachován teplotní gradient při dalším ochlazování (což je vzhledem k relativně špatné tepelné vodivosti skla běžné), pak při následném vyrovnání teplot v celém výrobku, již rozdíl v objemu původně různě teplých oblastí není kompenzován viskózním tokem a ve skle zůstává (regulérní) trvalé napětí. Ve vychlazeném skleněném výrobku zůstane tedy trvalé vnitřní napětí, které se rovná svojí velikostí tomu napětí, které se v průběhu ochlazování vyrovnalo vnitřním viskózním tokem, ale má opačné znaménko (opačný charakter), [13, 139]. Tento jev je známý a dostatečně popsán. V technologické praxi lze nastavit takové podmínky, aby trvalé napětí ve výrobku bylo na přijatelné úrovni.

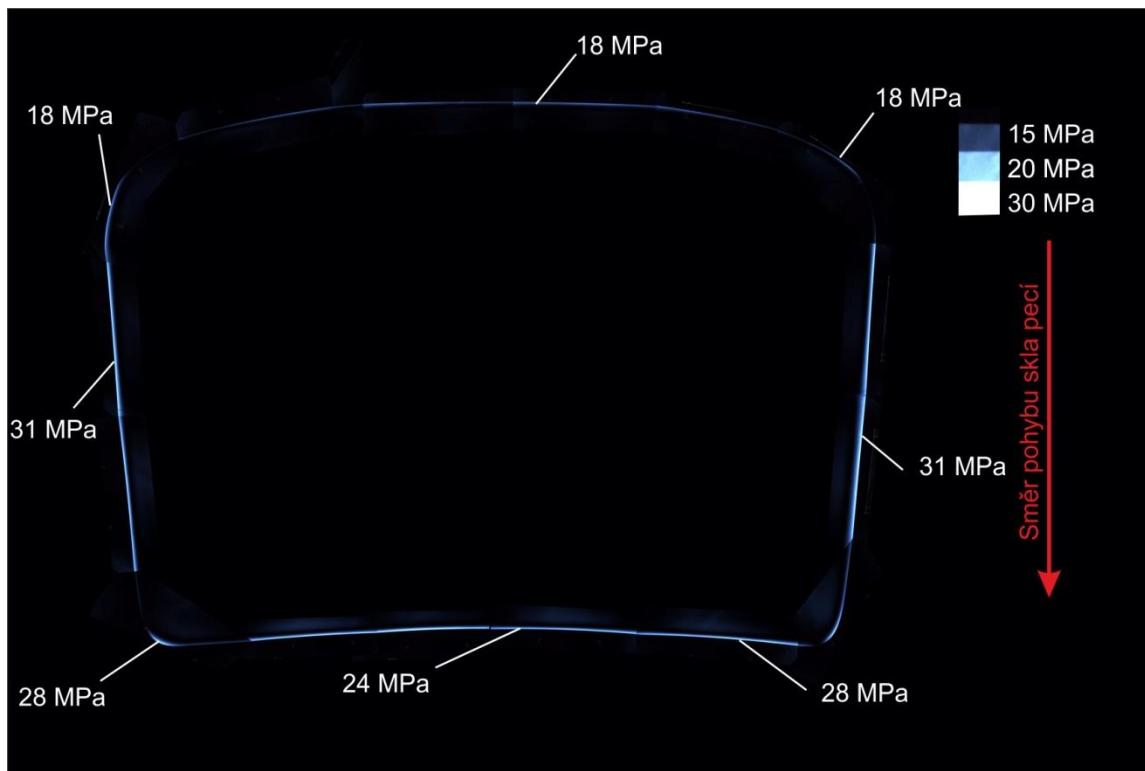
Naproti tomu výskyt membránového napětí není zákonitě zcela nezbytný a příčinou jeho vzniku jsou nerovnoměrné teploty v rovině skla v průběhu tvarování, resp. chlazení [139]. Pomocí polarizačního přístroje (kap. 6.1.1) je možné obecně napětí ve výrobku detekovat (není důležitý jeho původ ani trvání, lze detekovat i tzv. přechodné napětí, které vymizí po skončení příčiny, která napětí vyvolala). Membránové napětí je v tomto přístroji viditelné kolmo na povrch tabule a napříč tloušťkou skla je konstantní. Uvedené membránové napětí bylo detekováno v předním automobilovém skle pomocí připraveného polarizačního zařízení složeného z osvětlovače s polarizační folií, průmyslové barevné kamery a polarizačního filtru, Obr. 6.26. Měření bylo prováděno postupně vzhledem k velikosti skla a snaze detekovat membránové napětí v celé délce hran vzorků skla. Snímky byly následně složeny v grafickém programu.



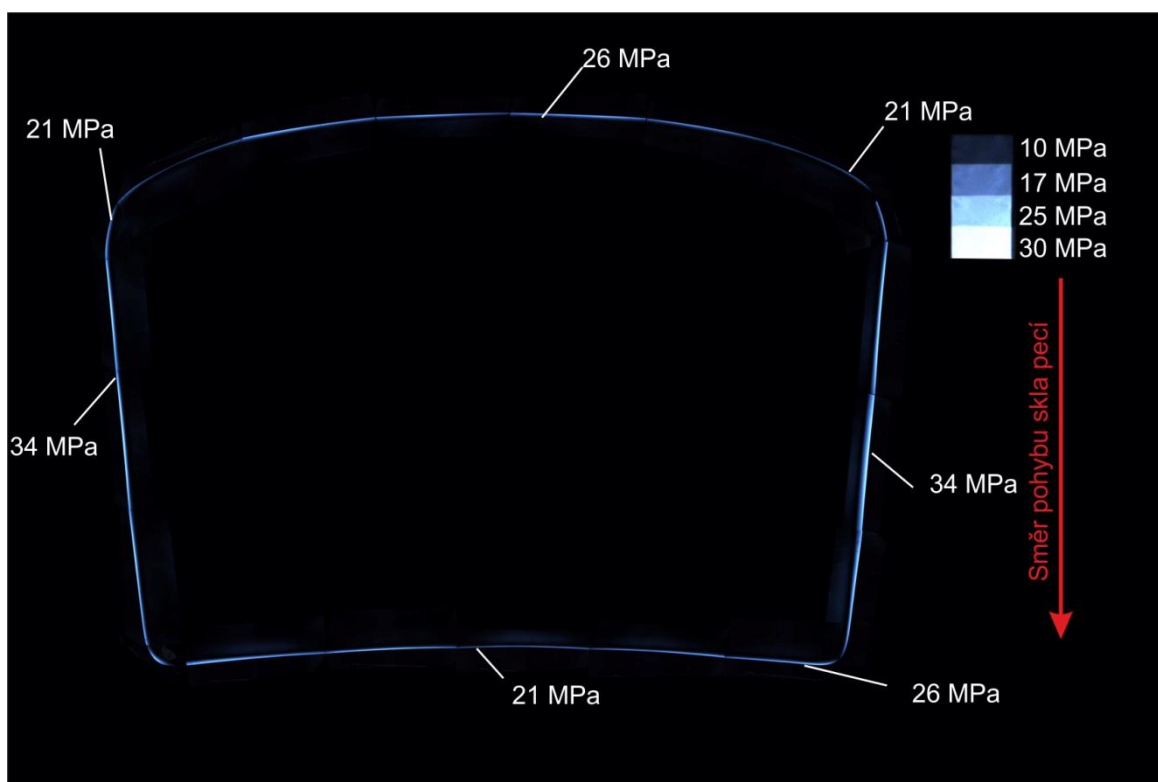
Obr. 6.26 Polarizační zařízení pro detekci napětí v automobilovém skle

Měření probíhalo na vzorcích s označením A (tloušťky 1,6 mm) a B (tloušťky 2,1 mm). Vedle experimentálního zařízení bylo také použito laboratorního polarizačního přístroje, kterým bylo stanoveno napětí ve vybraných místech vzorku pomocí Sénarmontova

kompenzátoru. Membránové napětí se podařilo detekovat, jak dokládá Obr. 6.27, pro sklo tloušťky 1,6 mm (vzorek A) a Obr. 6.28 pro sklo tloušťky 2,1 mm (vzorek B), uvedené číselné hodnoty v obrázku byly stanoveny na laboratorním polarizačním přístroji.



Obr. 6.27 Detekce napětí ve vzorku A, tloušťka 1,6 mm



Obr. 6.28 Detekce napětí ve vzorku B, tloušťka 2,1 mm

Napětí je nejvyšší na bočních hranách, nižší je na dolní a horní hraně skla. Napětí mimo hrany nebylo ve skle daným zařízením detekováno, což neznámá, že napětí ve skle není, může být jen relativně nízké. Z výsledků vyplývá, že je možné membránové napětí detekovat a kvantifikovat. Možné je také tento proces automatizovat a umístit na výrobní linku.

Obecně se membránové napětí vyskytuje minimálně v případě dlouhých chladicích pecí s rovnoměrným rozložením teplot. V těchto pecích není větší prostor pro vznik podélného a příčného teplotního gradientu a tudíž je eliminováno membránové napětí. Membránové napětí je naopak možné sledovat u kratších chladicích pecí, kde se bez speciálních opatření vyskytuje membránové napětí dané teplotním rozdílem mezi středem a okrajem skla [153, 154]. Membránové napětí se také s časem relativně snižuje. Pokud je membránové napětí po 1 minutě od jeho vzniku 100 %, pak napětí po 1 hodině je pod úroveň 80 % napětí, po 1 dni je to zhruba 65 % a po 1 roce zhruba 45 % [155]. Práce čerpá z výzkumu [G22].

6.5 Příklad aplikace: získání 3D obrazových dat pomocí konfokálních snímačů

Aplikace konfokálních snímačů je nyní velice aktuální, ale problematika bodových snímačů pro získání 3D obrazových dat je sama o sobě velmi rozsáhlá. Uvedený stav výzkumu je zde popsán pouze v základních testech a na výsledcích výzkumu pro následný aplikační výzkum. S ohledem na ochranu duševního vlastnictví zde není zmíněn aplikační výzkum a samotný návrh a vývoj zařízení pro konkrétní výrobní linku. Text, obrázky a schémata v této části jsou také ve velké míře shodné s disertační prací [5], která vznikala souběžně s touto habilitační prací. Oba autoři byli součástí řešitelského týmu a podíleli se na klíčových pracích tohoto výzkumu. Obě práce čerpají z výzkumné zprávy z projektu [G21].

6.5.1 Současné parametry a možnosti snímačů

Princip konfokálních snímačů je uveden v kap. 3.1.7.5, kde jsou popsány i základní výhody a nevýhody. Možnosti využití konfokálních snímačů ve sklářské praxi byly také prezentovány v [25]. Mezi nejvýznamnější výrobce a dodavatele konfokálních snímačů patří firma STIL [26], PRECITEC OPTRONIK [156], FOCALSPEC [157] a OMRON [158], další firmy využívají produktů uvedených výrobců a dodávají snímače pod vlastní značkou, jako např. MICRO-EPSILON, SICK a další.

Samotný snímač je nejčastěji rozdělen na dvě části: snímací hlavici a vyhodnocovací jednotku, kap. 3.1.7.5. V současné době se také začínají objevovat kompaktní systémy sdružující obě části dohromady, příkladem může být CHRcodile C od firmy PRECITEC OPTRONIK, měřicí rozsah (v ose z) do 10 mm [159]. Existují také vícebodové konfokální snímače (multi-point sensors), příkladem je snímač firmy PRECITEC OPTRONIK, který je osazen do linky firmy Heye International na kontrolu tloušťky obalového skla. Tento snímač umožňuje sledovat tloušťku skla až 12 body na linii 10 mm [160]. Vedle bodového měření se

Lze setkat i s liniovým (řádkovým) provedením konfokálního snímače. Jedná se v podstatě o mnohabodový snímač, příkladem může být zařízení STIL MPLS 180 se 180 body, s měřicím rozsahem (v ose z) až 2,6 mm, s délkou linie 4,1 mm a s frekvencí snímání linie až 2 kHz [161] nebo PRECITEC OPTRONIK CHRcodile CLS se 192 body, s měřicím rozsahem až 4 mm, s délkou linie 4,8 mm a s frekvencí snímání linie až 2 kHz [162]. Další liniový senzor je LCI1600 od firmy FocalSpec, s délkou linie 16,4 mm, s měřicím rozsahem až 5,5 mm, rychlost snímání linie max. 0,5 kHz, [157].

Konfokální snímače jsou dnes v průmyslové praxi používány především pro velmi přesné měření v malém rozsahu měření. Často jsou uváděny příklady proměřování tištěných spojů s mikrosoučástkami elektroniky a skel mobilních zařízení. Pro širší aplikace v průmyslové praxi jsou limitem především měřicí rozsahy a také možné maximální úhly odklonu (kap. 3.1.7.5). Velikost rozsahu a možné odchýlení od normály měření jsou parametry, mezi kterými je negativní korelace. Pro rozsah 42 mm je odchylka od normály $\pm 2,5^\circ$ (snímací hlavice STIL OP42000), pro rozsah měření 1 mm je odchylka od normály $\pm 45^\circ$ (snímací hlavice PRECITEC CHRcodile sensor 1 mm).

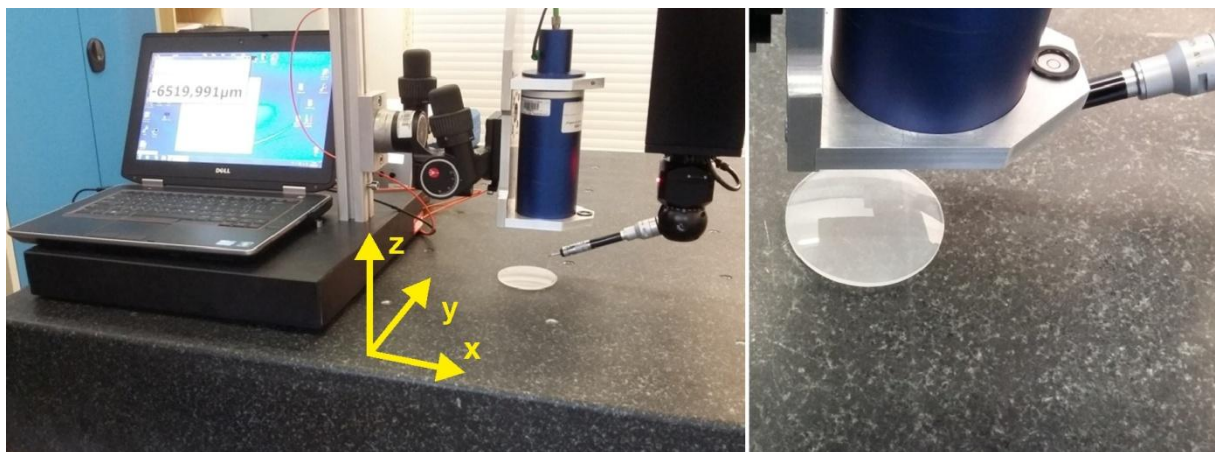
Konfokální snímače jsou uváděny jako velmi přesné snímače s detekovatelnou vzdáleností až v nm. Z hlediska fyzikálního principu a ověřených parametrů při použití v laboratořích je deklarovaná přesnost pro následně uvedenou aplikaci dostatečná a ověřená.

Pro zjištění aplikačních možností konfokálních snímačů v průmyslové praxi bylo provedeno několik testů, které byly zaměřeny na ověření parametrů konfokálních snímačů při průmyslovém použití a na možnosti použití automatizační techniky pro manipulaci s nimi (především průmyslových robotů). Pro testy byly nejdříve použity konfokální snímače od firmy PRECITEC OPTRONIK, model vyhodnocovací jednotky CHRcodile S, propojené přes USB rozhraní s notebookem, na kterém se měřená data vyhodnocují v programu CHRcodile Explorer, použitá snímací hlavice 25 mm (rozsah měření). Výsledky byly také ověřeny na konfokálních snímačích značky STIL, vyhodnocovací jednotka CCS PRIMA, propojené přes USB, vyhodnocovací a parametrizační program CCS Manager a snímací hlavice CL6MG20 (rozsah měření 30 mm).

Použitý souřadnicový systém pro tento výzkum je na Obr. 6.29.

6.5.2 Základní testy

V rámci počátečního výzkumu byly provedeny základní testy na pracovišti pro testování bezdotykových technologií měření. Připravené pracoviště pro testování konfokálních snímačů je vybaveno (mimo jiné) posuvným stolem se servopohonem a enkodérem pro odměřování snímané pozice. V software, připraveném v prostředí LabView, jsou hodnotám z konfokálního snímače přiřazeny pulzy enkodéru. Tím je generována závislost mezi aktuální polohou proměřovaného místa a naměřenými hodnotami vzdáleností od horní plochy skla, spodní plochy skla a tloušťkou.



Obr. 6.29 Provedení experimentu k posouzení přesnosti konfokálních snímačů na 3D SMS zařízení

Bylo ověřeno, že významný vliv na výsledky při zhoršených světelných podmínkách má frekvence snímání a stanovení prahů (minimální intenzita detekovaných píků pro měření vzdálenosti). U obou testovaných výrobců konfokálních snímačů je frekvence snímání spojena s dobou expozice. Pro praktické využití snímačů v praxi je vhodné pro eliminaci rušivých vlivů z okolí (šumu od vnějšího osvětlení) zvolit maximální intenzitu záření, která vyžaduje krátkou expozici. Tato expozice mohla být řízena jen frekvencí, která ovšem nemohla být příliš vysoká s ohledem na limity v objemu přenášených dat.

Pro zjištění potenciálních možností bylo také provedeno úvodní testování skel s různou povrchovou úpravou. Testování bylo realizováno na několika vzorcích plochého a obalového skla.

U plochého skla FLOAT bylo testováno různé zabarvení ve hmotě skla a různé povrchové úpravy. V případě testovaného zabarvení, pro běžně používané zabarvení skla FLOAT, se neprokázala omezení v použití konfokálních snímačů. V případě tenkých vrstev nanesených na povrch skla, které jsou více odrazivé pro viditelné optické elektromagnetické záření, není možné již měřit tloušťku skla, pokud je odrazivá vrstva směřována na stranu měření konfokálním snímačem (paprsek již neprochází sklem, ale odráží se). Vzdálenosti jsou měřitelné. V případě ornamentního skla (litého skla s povrchovou strukturou) není u většiny motivů možné měřit vzdálenosti a tloušťky skla. Motivy jsou většinou natolik členité, že dochází k odrazům a lomům, které jsou mimo rozsahy uváděných úhlů možného odklonu od normály.

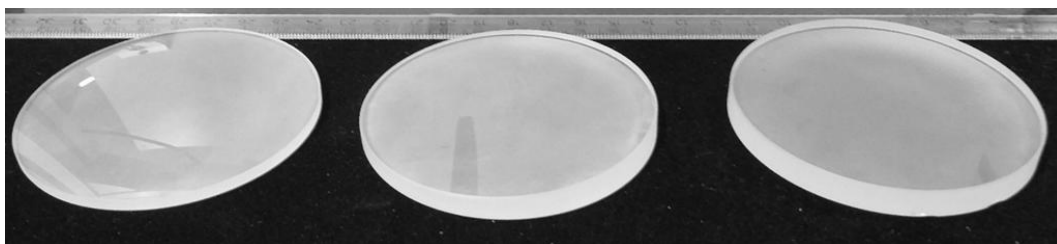
Byly také provedeny základní testy použití konfokálních snímačů na obalovém skle. Jako problematické se ukázalo proměření vzdálenosti a tloušťky u vysoce barveného hnědého skla „ambr“.

6.5.3 Ověření deklarovaných předností konfokálních snímačů pomocí 3D souřadnicového měřicího stroje

Pro ověření výrobcí deklarovaných přesností konfokálních snímačů při běžném použití (okolní osvětlení, teplota,...) bylo provedeno jejich porovnání na zařízení 3SD SMS od firmy DEA SpA, model ALPHA, motorizovaná hlavice pro odměřování Renishaw (3D souřadnicový měřicí stroj, kap. 3.6). Zařízení bylo umístěno v klimatizované místnosti. Pro upevnění konfokální snímací hlavice (PRECITEC OPTRONIK, 25 mm) byl použit stojan s granitovou deskou a polohovací hlavou Manfroto, Obr. 6.29. Postupně byla použita dvě dotyková tělíska na konci motorizované hlavy pro odměřování: kulička průměr 2 mm a 1 mm.

Pro účely ověření a testů bezdotykových technologií měření, byla zadána výroba tří etalonů (Obr. 6.30), u kterých výrobce (Dioptra a.s., Turnov) zaručuje přesnost obrobených a leštěných ploch:

- Planparalelní destička o průměru 76,2 mm, tloušťky 7,7 mm, jednostranně broušena a druhá strana leštěna s vysokou přesností roviny.
- Klínová destička o průměru 76,2 mm, tloušťky 4,2 až 7,7 mm, úhel 2,61 °, jednostranně broušena a druhá strana leštěna s vysokou přesností roviny.
- Plankonvexní čočka o průměru 76,2 mm, střední tloušťky 7,6 mm, poloměr kulové plochy 199,92 mm (nominálně 200 mm), jednostranně broušena a rádiusová strana leštěna s vysokou přesností kulové plochy.



Obr. 6.30 Přesné etalony pro ověření parametrů měření konfokálních snímačů, zleva: plankonvexní čočka, klínová destička, planparalelní destička

Následný experiment porovnával naměřené vzdálenosti bodu na povrchu etalonu od základny (granitové desky SMS) v ose z (Obr. 6.29) pomocí konfokálního snímače a SMS. Při experimentu byla provedena nejprve kalibrace 3D SMS a dále seřizena hlavice konfokálního snímače, aby byla zajištěna její kolmá poloha vůči základně. Odměřování probíhalo na základě získání 4 bodů na válcovém tělese hlavice. Následně byl stanoven v software 3D SMS bod, ve kterém dochází k měření konfokálním snímačem (průmět osy válcového tělesa hlavice a základny). Následně byla stanovena měřená výška vzorku pomocí konfokálního snímače a na tuto výšku spolu s polohou nastaveno dotykové odměřování. Dotykové tělísko najíždělo v ose konfokálního snímače směrem dolů k odměřovanému etalonu a po dotyku došlo ke změření jeho výšky.

Výsledky experimentu jsou v Tab. 6.1, Tab. 6.2 a Tab. 6.3. Z výsledků vyplývá, že průměr měřeného tělíska má vcelku logicky vliv na výsledek, a to především při měření čočky a klínu. Při použití kuličky průměru 1 mm jsou rozdíly v měření mezi konfokálními snímači a

dotykovým odměřováním velmi malé, většinou pod 10 μm , což je již na hranici deklarované přesnosti použitého 3D SMS.

Tab. 6.1 Výsledky porovnání rozdílů v měření na planparalelní destičce, kulička průměr 2 a 1 mm

Měření	Zařízení	Naměřená hodnota, kulička prům. 2 mm [mm]	Naměřená hodnota, kulička prům. 1 mm [mm]
1	Konfokál	7,702	7,697
	SMS	7,708	7,693
	Rozdíl	-0,006	0,004
2	Konfokál	7,701	7,706
	SMS	7,707	7,698
	Rozdíl	-0,006	0,008
3	Konfokál	7,701	7,706
	SMS	7,708	7,698
	Rozdíl	-0,007	0,008

Tab. 6.2 Výsledky porovnání rozdílů v měření na klínové destičce, kulička průměr 2 a 1 mm

Měření	Zařízení	Naměřená hodnota, kulička prům. 2 mm [mm]	Naměřená hodnota, kulička prům. 1 mm [mm]
1	Konfokál	5,069	4,978
	SMS	5,098	4,975
	Rozdíl	-0,029	0,003
2	Konfokál	6,027	5,862
	SMS	6,053	5,861
	rozdíl	-0,026	0,001
3	Konfokál	6,401	6,697
	SMS	6,428	6,698
	Rozdíl	-0,027	-0,001
4	Konfokál		5,391
	SMS		5,391
	Rozdíl		0,000
5	Konfokál		7,117
	SMS		7,117
	Rozdíl		0,000

Tab. 6.3 Výsledky porovnání rozdílů v měření na plankonvexní čočce, kulička průměr 2 a 1 mm

Měření	Zařízení	Naměřená hodnota, kulička prům. 2 mm [mm]	Naměřená hodnota, kulička prům. 1 mm [mm]
1	Konfokál	7,552	7,5212
	SMS	7,559	7,517
	rozdíl	-0,007	0,004
2	Konfokál	6,391	6,930
	SMS	6,447	6,936
	rozdíl	-0,056	-0,006
3	Konfokál	4,580	5,407
	SMS	4,656	5,419
	rozdíl	-0,076	-0,012
4	Konfokál		5,266
	SMS		5,275
	rozdíl		-0,009
5	Konfokál		7,517
	SMS		7,513
	rozdíl		0,004

6.5.4 Testování naklonění konfokálních snímačů, rušení směrovým světlem a další vlivy

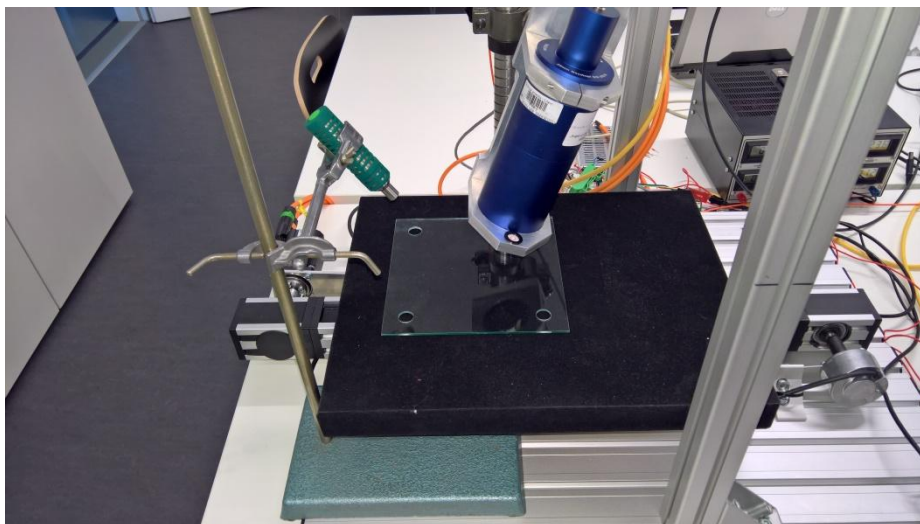
Pro aplikaci konfokálních snímačů v praxi je důležité znát okrajové podmínky jejich použití. Mezi nejdůležitější patří vliv světelného rušení a vliv úhlu odklonu mezi optickou osou snímací hlavičky a normálou vzhledem k povrchu vzorku, kap. 3.1.7.5.

Okolní světlo bude vždy ovlivňovat měření pomocí konfokálního snímače, jeho vliv může být pod hranicí měření nebo může být významný. Obecně, rozptýlené difúzní osvětlení má menší vliv na měření pomocí konfokálních snímačů, naopak směrové světlo, dopadající přímo na bod měření, může měření úplně znehodnotit. Při běžném osvětlení místnosti pomocí běžných osvětlovacích těles je možné minimalizovat vliv osvětlení vhodným nastavením snímače. Směrové světlo je třeba minimalizovat nebo odstínit.

Maximální úhel odklonu snímací hlavičky je dán výrobcem a odpovídá stanovenému úhlu pro zrcadlový povrch. Cílem experimentů bylo stanovit skutečnou míru vlivu úhlu na měření u objektů ze skla. Při experimentech s náklonem snímací hlavičky byl sledován i vliv směrového osvětlení pod daným úhlem, Obr. 6.31.

Hlavičky konfokálního snímače byla postupně naklápěna na obě strany, a to po 1°. Byly zaznamenávány vzdálenosti od vzorku a maximální odchylky, které se posuzovaly od převládající hodnoty a tloušťky vzorku také s maximálními odchylkami. V Tab. 6.4 jsou

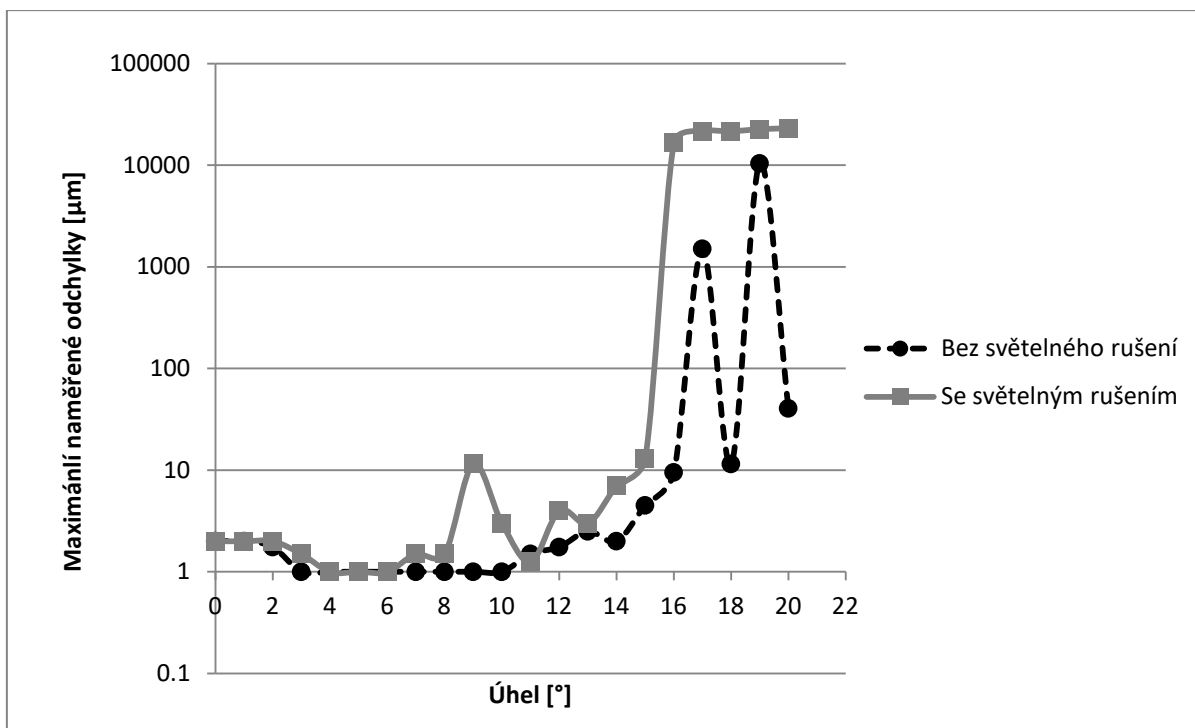
naměřené hodnoty zprůměrovány, aby byl eliminován potenciální vliv nepřesností desky, na kterou byl umístěn vzorek. Měření probíhalo za zapnutého osvětlení (zářivková tělesa, laboratoř bez oken). Výsledné hodnoty byly také přeneseny do grafu (Obr. 6.32), ve kterém je zobrazena závislost naměřené maximální odchylky na náklonu snímací hlavičky a světelném rušení. Výrobce garantovaný úhel $\pm 15^\circ$ je uváděn pro zrcadlovou plochu, jak se prokázalo je i hranicí pro odměřování vzdálenosti skla, nad kterou už se měření, především se světelným rušením, stává nepřesným a nespolehlivým. Přesnější měření proběhlo následně s konfokálními snímači STIL, kde výsledky překračovaly jejich použitelnost pro náklony vyšší, než deklarované.



Obr. 6.31 Pohled na experiment s náklonem snímací hlavičky a rušením směrovým světlem

Tab. 6.4 Měření vlivu náklonu snímací hlavičky a rušení směrovým světlem

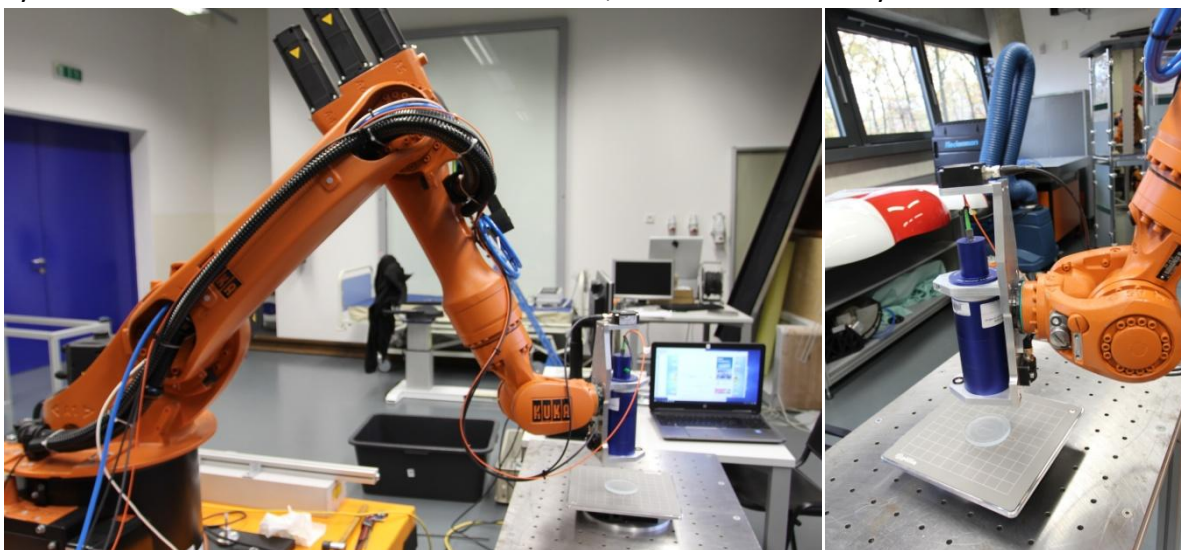
Náklon [°]	Vypočtená vzdálenost [μm]	Vypočtená tloušťka [μm]	Bez světelného rušení				Se světelným rušením			
			Průměrná vzdálenost [μm]	Průměrná odchylka vzdálenosti [μm]	Průměrná tloušťka [μm]	Odchylka tloušťky [μm]	Naměřená vzdálenost [μm]	Max. odchylka vzdálenosti [μm]	Naměřená tloušťka [μm]	Max. odchylka tloušťky [μm]
0	6558	2790.7	6616.7	2	2790.7	2.25	6616.7	2	2790.9	2.25
1	6589.4539	2791.1251	6633.25	2	2810.15	2.5	6633.2	2	2810.25	2.25
2	6683.8635	2792.401	6784.7	1.75	2801.35	2.75	6784.8	2	2801.65	2.25
3	6841.3727	2794.5296	7047.05	1	2746.9	2	7047.15	1.5	4901.5	2
4	7062.2222	2797.5142	7386.8	1	2720.9	1.5	7386.8	1	2720.8	2
5	7346.7498	2801.3594	7765.6	1	2736.3	2	7766.1	1	2736.4	1.75
6	7695.3923	2806.071	8197.15	1	2757.7	1.75	8197.15	1	2757.6	1.75
7	8108.6869	2811.6564	8748.4	1	2746.1	1.75	8748.4	1.5	2746.05	2
8	8587.273	2818.1242	9372.1	1	2785.9	1.75	9367.7	1.5	2785.9	2
9	9131.8951	2825.4844	10042	1	2783.15	1.25	10042.25	11.5	2783.5	11.5
10	9743.405	2833.7485	10828.85	1	2799.2	1.25	10828.75	3	2799.25	2.5
11	10422.766	2842.9296	11715.5	1.5	2837.55	2.25	11715.7	1.25	2837.4	2.5
12	11171.056	2853.0422	12691.25	1.75	2795.05	3	12691.35	4	2845	3.5
13	11989.471	2864.1024	13752.9	2.5	2867.8	3.25	13752.95	3	2867.85	4.5
14	12879.332	2876.1283	14934.1	2	2880.05	3.25	14934	7	2880.15	6.5
15	13842.089	2889.1393	16258.45	4.5	2896.5	5.5	16255.3	13	2896.25	28
16	14879.326	2903.1568	17552.95	9.5	2866.15	18	17771.2	16500	2898.8	20000
17	15992.77	2918.2042	22029.75	1504	643	1811	22368.7	21500	635.6	24000
18	17184.296	2934.3068	20597	11.5	3629.5	13.5	N/A	21500	N/A	23500
19	18455.935	2951.4921	24726.8	10400	1018.65	9700	N/A	22500	N/A	22000
20	19809.887	2969.7898	24077.05	40.5	3636.9	32.5	N/A	23000	N/A	25000



Obr. 6.32 Závislost maximální odchylky měření vzdálenosti na úhlu

6.5.5 Testování na robotizovaném pracovišti

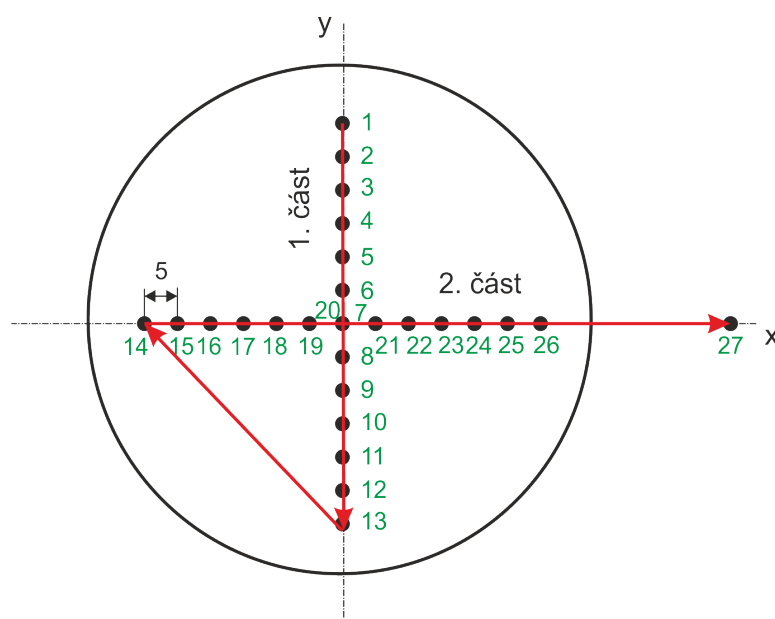
Kromě testování vlastností konfokálního snímače na 3D souřadnicovém měřicím stroji byla prověřena možnost jeho instalace na průmyslový robot (Obr. 6.33), konkrétně robot KUKA KR 16 v kombinaci s řídicím systémem KRC4, u kterého je výrobcem definovaná přesnost polohování na úrovni $\pm 0,05$ mm. Postupně byla testována citlivost přesnosti konfokálního snímače na orientaci měřené transparentní plochy dané natočením kolem osy x a y , které bylo odměřováno externím snímačem náklonu, inklinometrem firmy Balluff.



Obr. 6.33 Robotické pracoviště s instalovaným konfokálním snímačem

Referenční vzdálenost snímací hlavičky od měřené plochy byla navíc snímána ultrazvukovým senzorem od firmy SICK, přičemž k základní (přibližné) nivelaci přípravku oproti upínacímu stolu skla (leštěné granitové desce) a souřadnicovému systému robotu byl použit systém bublinkových vodováh. Pro zajištění maximálně dosažitelné přesnosti polohování snímače vzhledem k upínacímu stolu byl sjednocen lokální souřadnicový systém robotu s rovinou stolu a následně v několika bodech proměřena odchylka rovinnosti, která se pohybovala na úrovni desítek setin milimetru, což odpovídá mechanickým vlastnostem sériového kinematického řetězce uvedeného robotu.

Řídicí systém robotu byl naprogramován na maximálně přesné najíždění nad etalonem na body uspořádané do kříže (celkem 26), plus jeden bod najíždějící mimo etalon, Obr. 6.34. Robot se v každém bodě měření zastavil. S ohledem na počáteční měření byla doba měření (zastavení) zvolena s větší rezervou a spolu s přesunem do nového bodu odpovídala zhruba 2 až 3 s. Tuto dobu je možné zkrátit na 1 s. Pro načítání dat z konfokálního snímače byla připravena softwarová utilita v prostředí LabView. Řídicí systém robotu vyslal po najetí do zvolené polohy signál (24 V odpovídající binárnímu číslu 1). Přes jednodeskový počítač Arduino je následně provedena komunikace s řídicím PC (notebookem), který komunikuje s vyhodnocovací jednotkou konfokálního snímače. Signálem z robotu je spuštěna sekvence odměřování. Data byla v době této sekvence uložena a následně byla vyhodnocena. Vyhodnocovací jednotka byla nastavena na získání dat z transparentních materiálů, proto byly získány tři hodnoty pro každý měřený bod: tloušťka, vzdálenost 1 a vzdálenost 2 (vše v ose z).

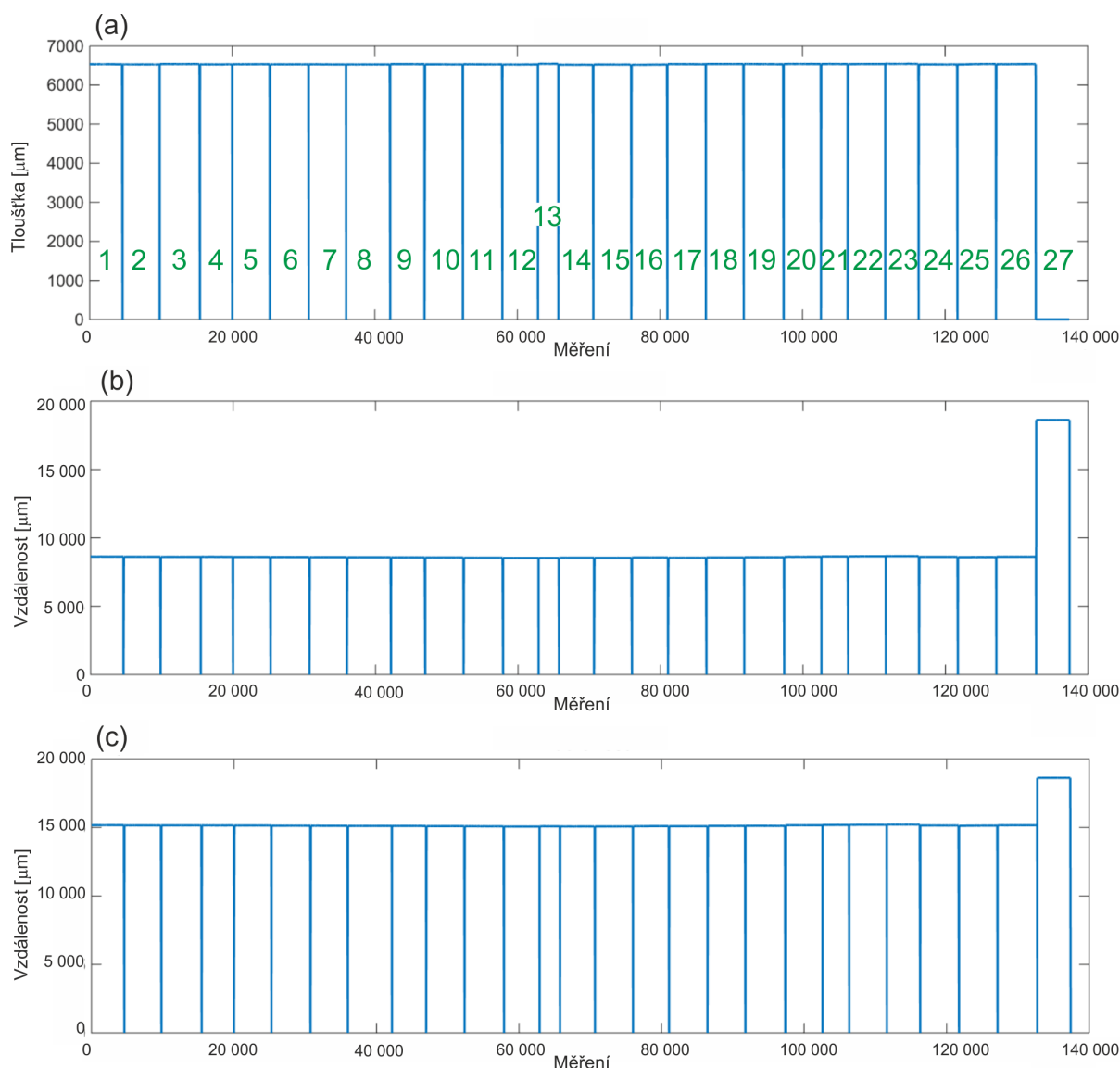


Obr. 6.34 Body měření na etalonu pomocí robotu a vyznačení směru pohybu robotu

V první fázi měření na robotizovaném pracovišti byly nastaveny správné časy odměřování tak, aby získaný signál odpovídal klidové poloze robotu. Po naprogramování pohybových úloh robotu a odladění časů byla analyzována výsledná přesnost měření soustavy robot – konfokální snímač při proměřování etalonů: planparalelní, klínové a plankonvexní destičky.

6.5.5.1 Planparalelní destička

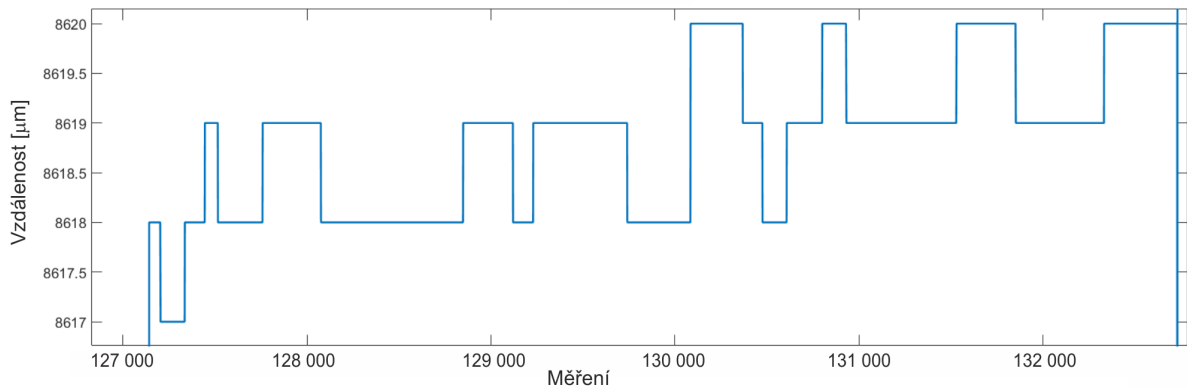
Výsledky z měření všech bodů bez úpravy jsou na Obr. 6.35. Data jsou v μm bez přepočtu zahrnujícího index lomu, Abbého číslo a další parametry. V Tab. 6.5 jsou uvedeny průměry spočítané z 3 000 měření pro každý bod pro surová data ze snímače. Jak se ukázalo, je vhodné použít průměr alespoň z několika tisícovek měření, protože dochází k oscilaci naměřených hodnot v řádu μm , Obr. 6.36 (pravděpodobně důsledek chvění snímací hlavy). Protože jsou rozdíly opravdu malé, je možné pro reálné nasazení zvážit zkrácení intervalu měření.



Obr. 6.35 Získaná surová data z konfokálního snímače pro (a) tloušťku, (b) vzdálenost 1 a (c) vzdálenost 2

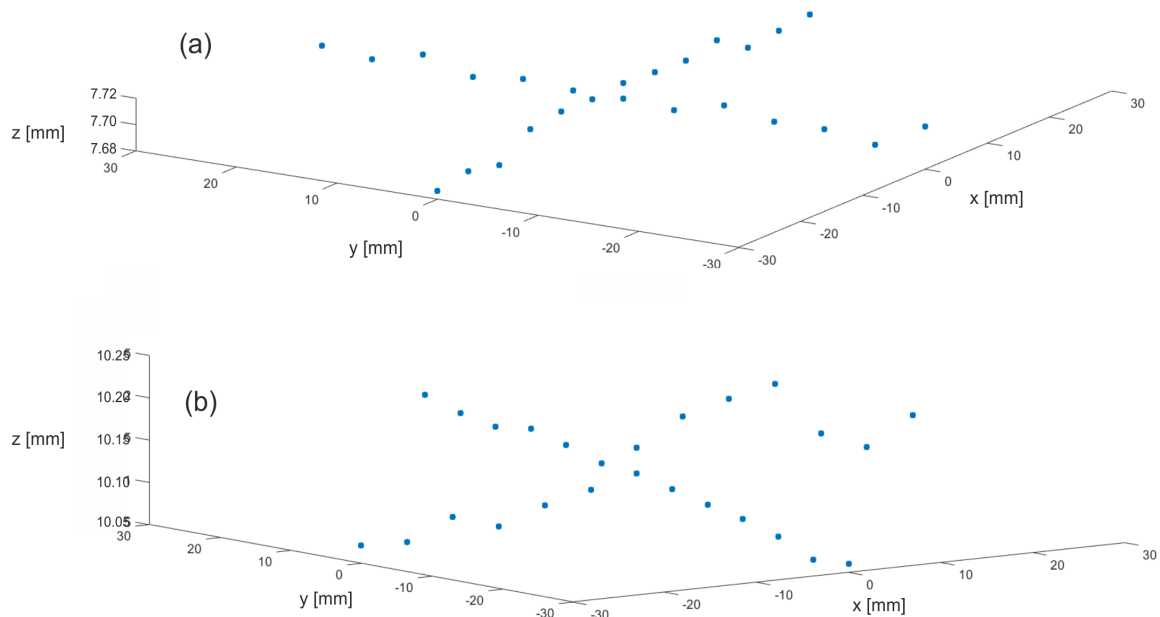
Tab. 6.5 Výsledky měření etalonu planparalelní destičky bez přepočtu (surová data z konfokálního snímače), průměry spočítané z 3 000 měření pro každý bod

Bod měření	Tloušťka [μm]	Vzdálenost 1 [μm]	Vzdálenost 2 [μm]
1	6 535	8 630	15 165
2	6 531	8 618	15 149
3	6 540	8 611	15 150
4	6 531	8 615	15 146
5	6 535	8 605	15 140
6	6 533	8 593	15 126
7	6 531	8 589	15 120
8	6 530	8 580	15 110
9	6 538	8 571	15 109
10	6 532	8 563	15 095
11	6 533	8 552	15 084
12	6 529	8 536	15 065
13	6 546	8 538	15 083
14	6 523	8 548	15 071
15	6 527	8 546	15 073
16	6 525	8 567	15 092
17	6 537	8 552	15 089
18	6 541	8 568	15 109
19	6 539	8 579	15 117
20	6 542	8 616	15 158
21	6 541	8 642	15 183
22	6 540	8 655	15 195
23	6 545	8 665	15 209
24	6 531	8 610	15 141
25	6 537	8 592	15 129
26	6 538	8 619	15 156
<i>Průměr</i>	6 535	8 591	15 126
<i>Směrodatná odchylka</i>	5.88	36.22	39.05
<i>Minimum</i>	6 523	8 536	15 065
<i>Maximum</i>	6 546	8 665	15 209
<i>Rozsah</i>	22.39	129.12	144.99
27	0	18 625	18 625

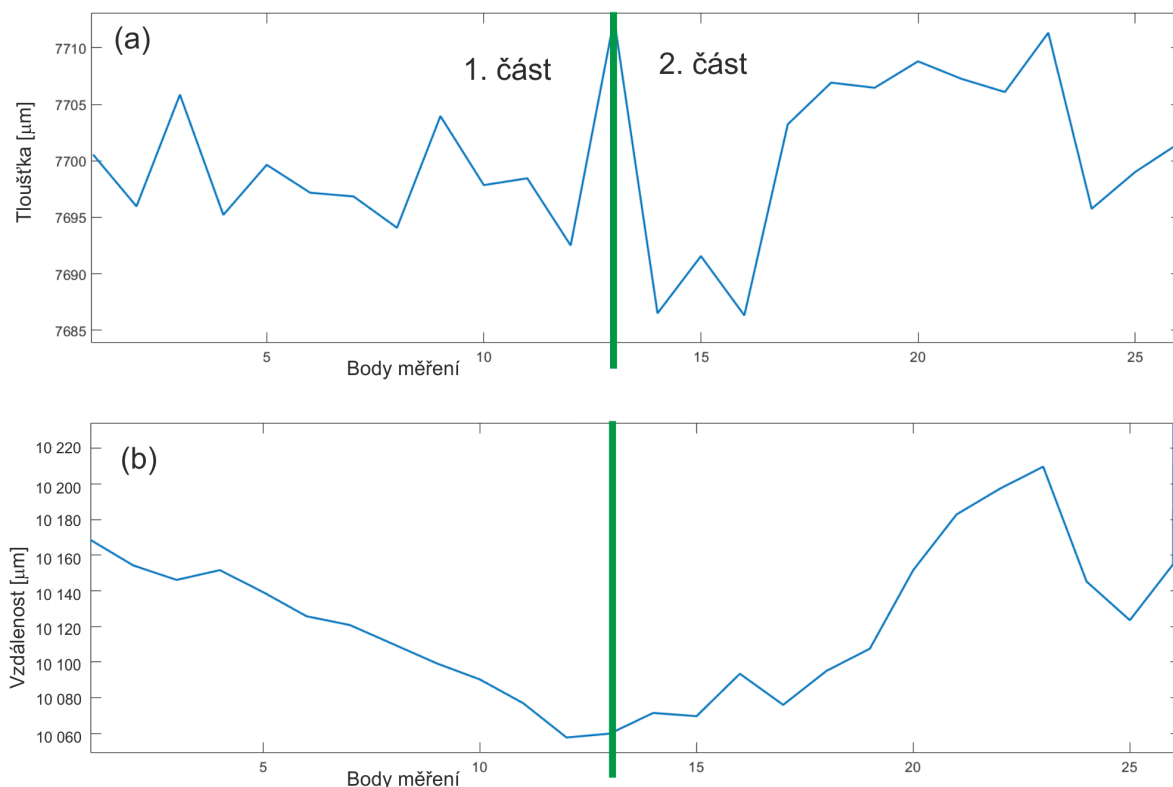


Obr. 6.36 Ukázka průběhu měření jednoho bodu, rozdíly jsou v řádech jednotek μm

Data byla následně přepočítána a získán skutečný rozměr měření. Pro každý bod byla spočítána průměrná hodnota pro bod měření opět z 3 000 naměřených bodů. Jednotlivé body je možné vykreslit ve 3D modelu, Obr. 6.37. Výsledky ale nejsou dobře zřetelné a obtížně se hodnotí, proto je lepší využít zobrazení ve 2D, Obr. 6.38. Jak je patrné z výsledků, rozdíly v naměřené tloušťce etalonů nejsou velké, jsou do $30\ \mu\text{m}$ a jsou dány chybou měření a okolním světelným rušením (není důležitá poloha snímací hlavice v ose z , neboť tloušťka je definována jako rozdíl vzdálenosti 2 – spodní strana etalonu a vzdáleností 1 – horní strana etalonu). Rozdíly jsou ve vzdálenosti 1 a 2 mezi jednotlivými body, a to o 100 až $200\ \mu\text{m}$. Protože byla prokázána přesnost vzorku, je pravděpodobně tento rozdíl dán polohou vzorku vůči snímáči (nakloněná granitová deska nebo souřadnicový systém robotu) a nepřesností polohování robotu. V případě nakloněné desky nebo souřadného systému by změna mezi body v jedné linii musela být lineární. Podle získaných měření k tomu částečně došlo, ale v měřené linii bodů jsou také skokové výchylky.

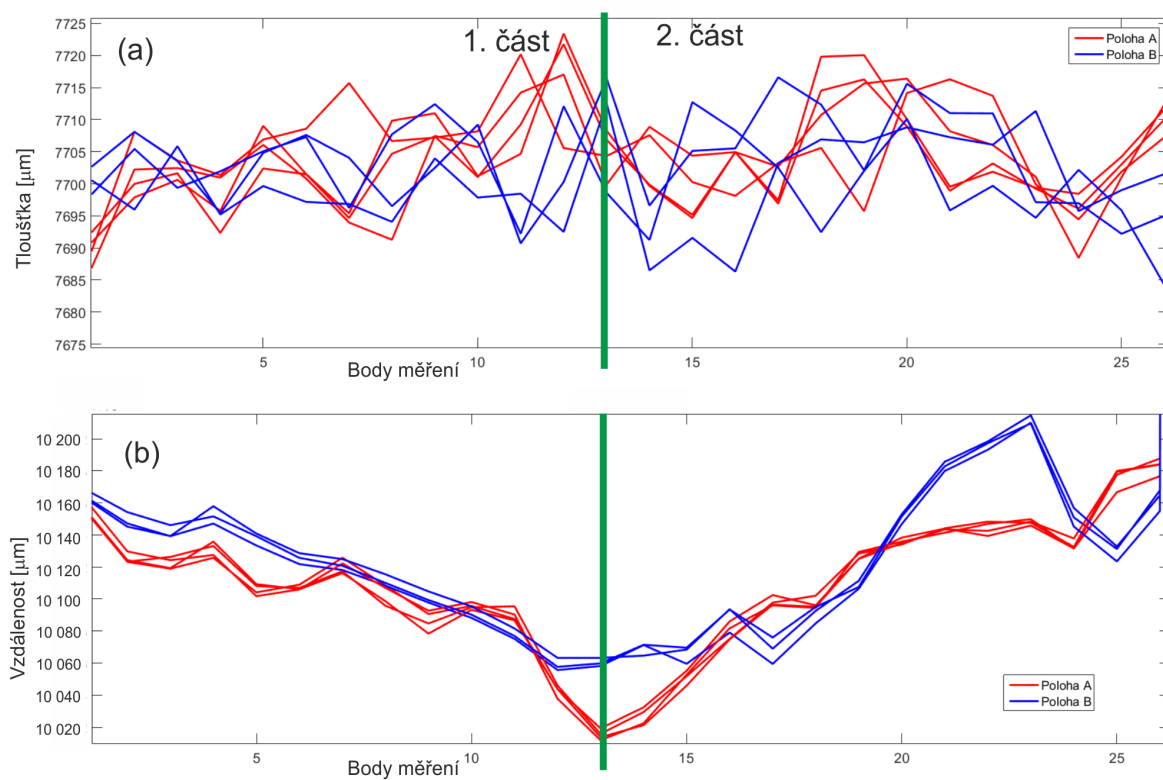


Obr. 6.37 Zobrazení výsledků průměrných vzdáleností planparalelní destičky pro jednotlivé body ve 3D grafu (a) tloušťka, (b) vzdálenost 1, (je patrný kříž ve kterém byly měřeny jednotlivé body), osy x , y a z v mm



Obr. 6.38 Zobrazení výsledků průměrných (a) tlouštěk a (b) vzdáleností pro jednotlivé body ve 2D grafu

Byla proto provedena opakovaná měření stejného vzorku na stejném místě a také po posunutí měřených bodů v robotu (jednalo se o posunutí celého kříže měřených bodů, poloha kříže). Na Obr. 6.39 jsou zobrazeny rozdíly v naměřené tloušťce etalonu a vzdálenosti 1. Jak je zřejmé, rozdíl v tloušťce je možné zdůvodnit chybou měření, v tomto případě je to více než 40 μm . V případě vzdálenosti 1 kopíruje průběh výsledků vždy podobné hodnoty pro každou ze dvou poloh kříže měřených bodů. Jak dokládá Tab. 6.6, rozsah naměřených hodnot je v měřených bodech podstatně menší při měření v dané poloze bodu kříže, maximálně 20 μm . Z analýzy výsledků vyplývá, že přesnost polohování daného robotu je pouze do 200 μm . Nicméně pro opakované najetí robotu do stejného bodu je přesnost o řád vyšší.



Obr. 6.39 Zobrazení výsledků průměrných (a) tloušťek a (b) vzdáleností pro opakovaná měření etalonu planparalelní destičky a po posunutí měřených bodů v řídicí jednotce robotu do polohy A a B

Tab. 6.6 Výsledky měření etalonu planparalelní destičky po přepočtu se dvěma polohami měřených bodů v kříži (posun měřených bodů v řídicím systému robotu), vzdálenost 1 [μm]

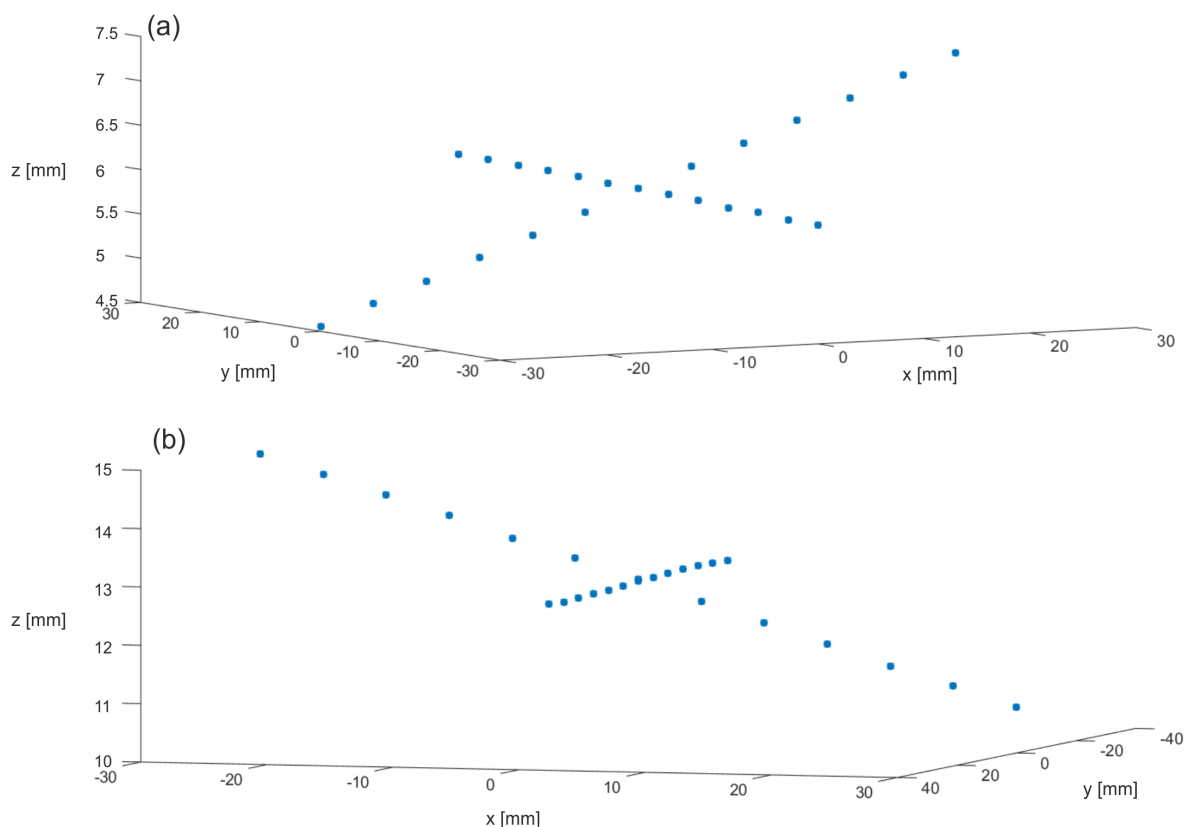
	Poloha bodů měřeného kříže A, vzdálenost 1[μm]									Poloha bodů měřeného kříže B, vzdálenost 1[μm]								
Bod měření					Prům.	Std	Min	Max	Rozsah				Prům.	Std	Min	Max	Rozsah	
	4 měření									3 měření								
1	10157	10163	10156	10157	10158	3.26	10156	10163	7.12	10164	10163	10169	10165	2.92	10163	10169	5.51	
2	10123	10130	10123	10124	10125	3.11	10123	10130	6.52	10147	10145	10154	10149	4.76	10145	10154	9.07	
3	10119	10124	10126	10119	10122	3.65	10119	10126	7.36	10139	10139	10146	10142	3.94	10139	10146	6.84	
4	10126	10127	10133	10136	10131	4.73	10126	10136	10.10	10147	10158	10152	10152	5.45	10147	10158	10.84	
5	10104	10102	10108	10109	10106	3.45	10102	10109	7.46	10133	10141	10139	10138	3.90	10133	10141	7.42	
6	10109	10106	10107	10106	10107	1.37	10106	10109	2.96	10122	10129	10126	10125	3.44	10122	10129	6.85	
7	10126	10122	10117	10116	10120	4.45	10116	10126	9.59	10118	10125	10121	10121	3.44	10118	10125	6.82	
8	10108	10107	10096	10099	10102	6.20	10096	10108	12.67	10108	10115	10110	10111	3.70	10108	10115	7.11	
9	10091	10093	10085	10078	10087	6.43	10078	10093	14.28	10098	10105	10099	10101	3.66	10098	10105	6.96	
10	10096	10098	10095	10093	10095	2.04	10093	10098	4.90	10088	10095	10090	10091	3.69	10088	10095	7.15	
11	10088	10090	10095	10087	10090	3.96	10087	10095	8.78	10075	10082	10077	10078	3.35	10075	10082	6.47	
12	10044	10038	10046	10044	10043	3.53	10038	10046	8.24	10056	10063	10058	10059	3.94	10056	10063	7.58	
13	10019	10012	10016	10014	10015	3.17	10012	10019	7.41	10058	10063	10060	10060	2.59	10058	10063	5.07	
14	10032	10022	10029	10021	10026	5.41	10021	10032	11.16	10071	10065	10071	10069	3.87	10065	10071	6.79	
15	10055	10053	10052	10046	10051	3.95	10046	10055	9.31	10060	10068	10070	10066	5.50	10060	10070	10.05	
16	10086	10082	10075	10075	10079	5.44	10075	10086	11.22	10079	10094	10093	10089	8.36	10079	10094	14.58	
17	10102	10096	10098	10096	10098	2.95	10096	10102	6.43	10059	10069	10076	10068	8.28	10059	10076	16.50	
18	10096	10094	10102	10095	10097	3.47	10094	10102	7.59	10085	10093	10095	10091	5.35	10085	10095	10.25	
19	10125	10129	10128	10125	10127	2.20	10125	10129	4.31	10106	10111	10108	10108	2.61	10106	10111	4.97	
20	10138	10136	10134	10135	10136	1.83	10134	10138	4.23	10147	10153	10152	10150	3.21	10147	10153	6.11	
21	10144	10141	10144	10143	10143	1.27	10141	10144	2.76	10180	10186	10183	10183	2.87	10180	10186	5.74	
22	10139	10147	10148	10143	10144	4.07	10139	10148	8.89	10193	10198	10197	10196	2.73	10193	10198	5.18	
23	10146	10150	10148	10148	10148	1.66	10146	10150	3.99	10210	10215	10210	10211	2.81	10210	10215	5.06	
24	10132	10131	10133	10138	10133	3.00	10131	10138	6.38	10151	10157	10145	10151	5.81	10145	10157	11.62	
25	10167	10178	10180	10179	10176	6.21	10167	10180	13.23	10131	10133	10123	10129	4.98	10123	10133	9.31	
26	10177	10188	10184	10184	10183	4.62	10177	10188	11.03	10168	10165	10155	10162	6.75	10155	10168	12.94	
Prům.	10110	10110	10110	10108						10119	10124	10122						
Std	39	44	42	44						45	43	43						
Min.	10019	10012	10016	10014						10056	10063	10058						
Max.	10177	10188	10184	10184						10210	10215	10210						
Rozsah	157	176	168	170						154	151	152						

Pozn: Std ... směrodatná odchylka

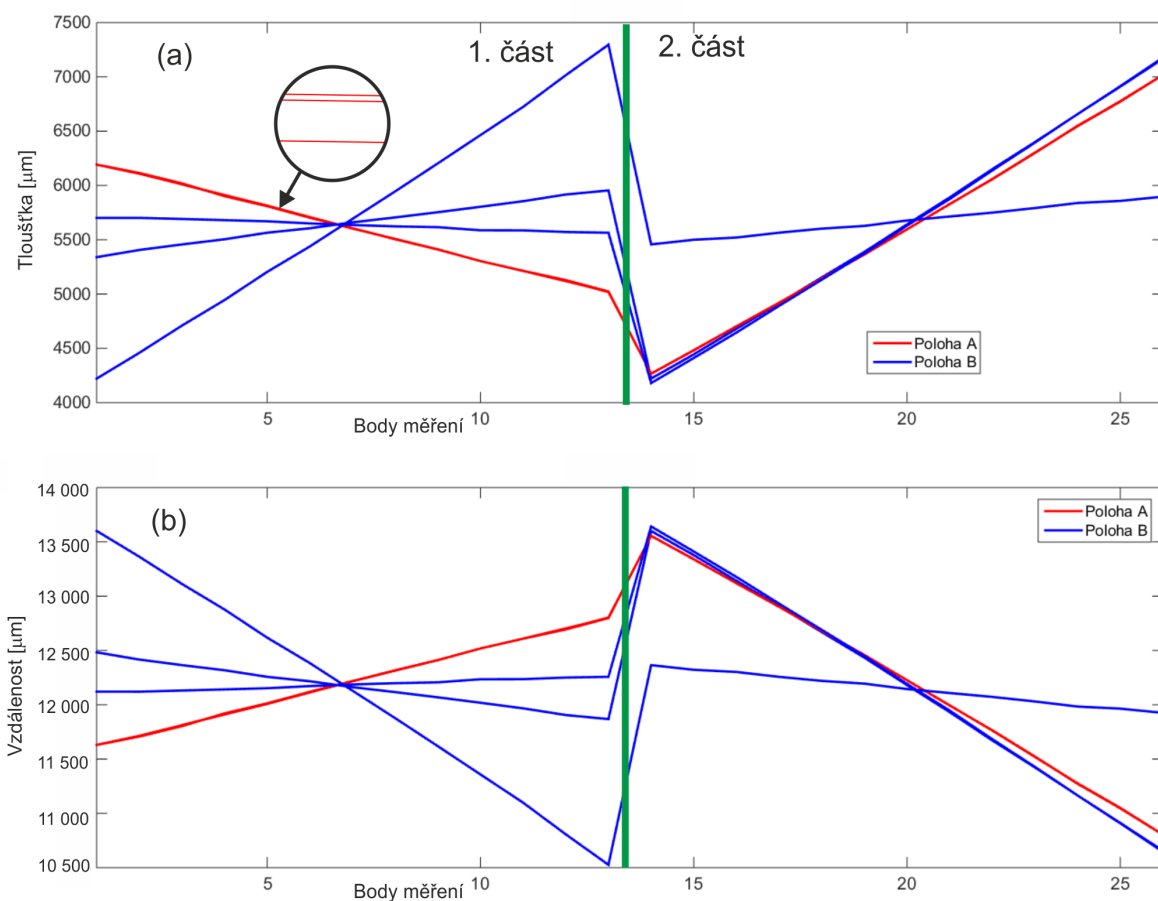
6.5.5.2 Klínová destička

Podobně jako u etalonu planparalelní desky i u klínové destičky byly provedeny experimenty se získáním 3D dat, Obr. 6.40. V grafu nejsou příliš patrné rozdíly mezi jednotlivými měřeními body, proto je pro porovnání s přesností měření jednotlivých bodů opět použito 2D grafů, Obr. 6.41. Tři opakovaná měření bez otočení skla v poloze měřených bodů A splývají díky zobrazení grafu pro výsledky tloušťky a vzdálenosti 1. Po porovnání opakovatelnosti měření v jednom bodě z Tab. 6.7 je zřejmá velmi dobrá shoda jednotlivých měření, pod $10\ \mu\text{m}$.

V poloze měřených bodů B bylo etalonem dále otáčeno, což je zřejmé z výsledků.



Obr. 6.40 Zobrazení výsledků průměrných (a) tloušťek a (b) vzdáleností 1 klínové destičky pro jednotlivé body ve 3D grafu, osy x , y a z v mm



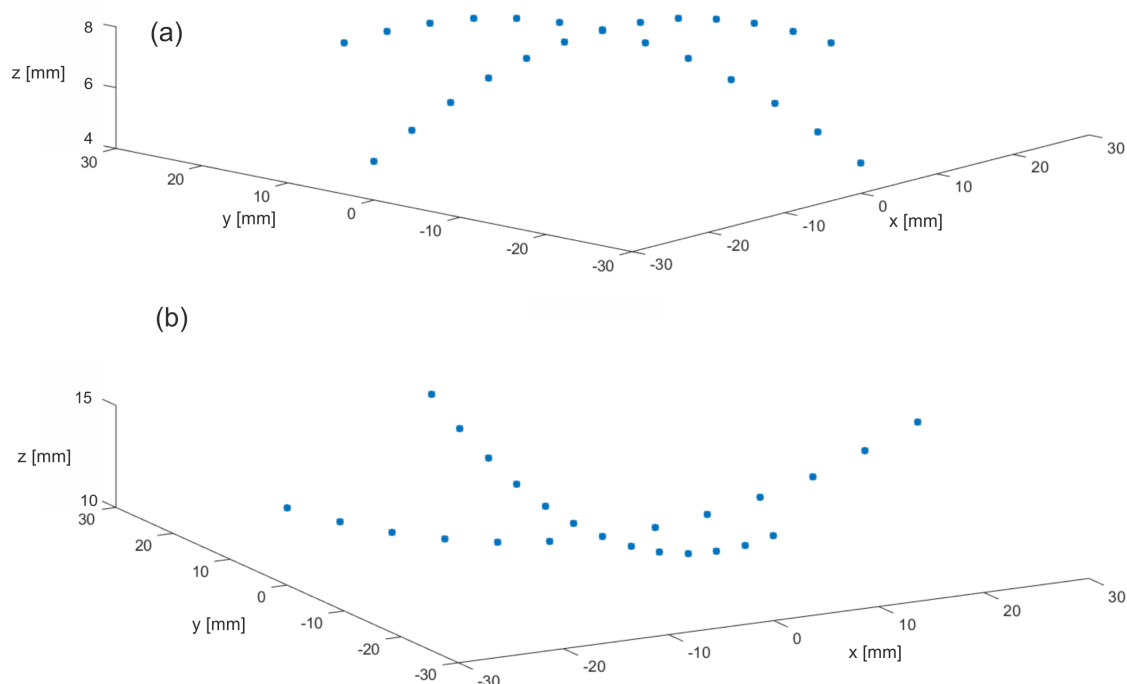
Obr. 6.41 Zobrazení výsledků průměrných (a) tlouštěk a (b) vzdáleností 1 pro opakovaná měření etalonu klínové destičky a po posunutí měřených bodů v řídicí jednotce robotu do polohy A a do polohy B

Tab. 6.7 Výsledky měření etalonu klínové destičky v poloze A měřených bodů v kříži (posun měřených bodů v řídicím systému robotu), vzdálenost 1 [μm]

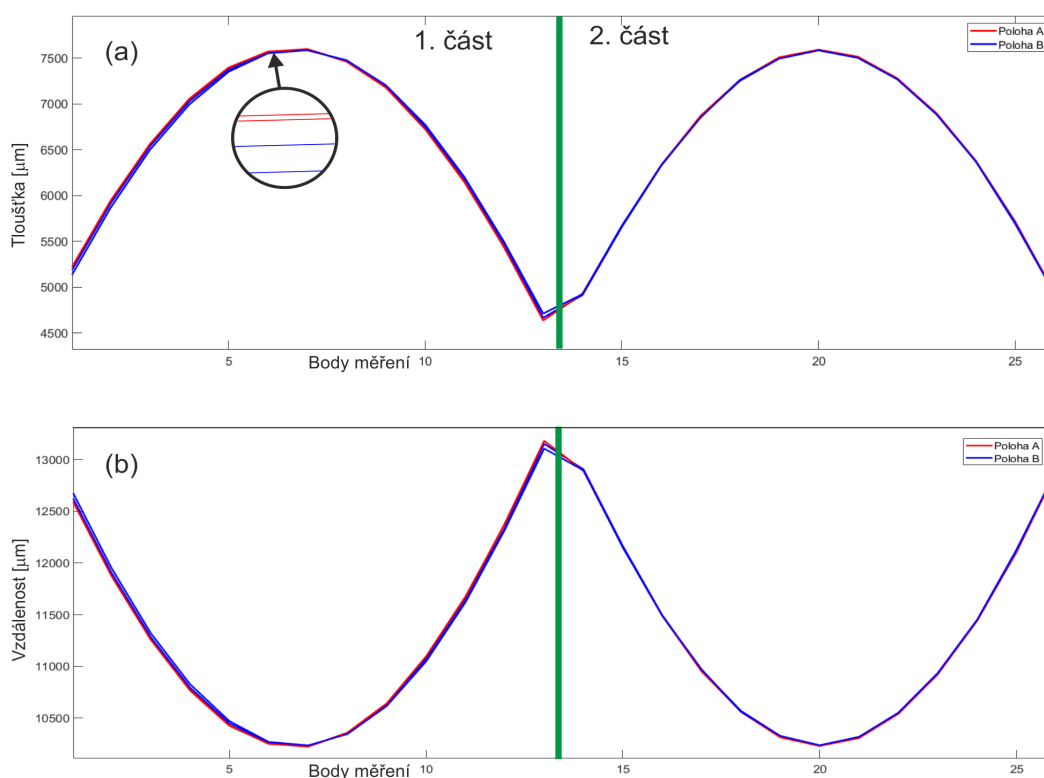
	Poloha bodů měřeného kříže A							
Bod měření	3 měření			Prům.	Std	Min	Max	Rozsah
1	11630	11630	11630	11630	0,32	11630	11630	0,62
2	11707	11714	11713	11711	3,75	11714	11707	6,87
3	11803	11812	11812	11809	5,03	11812	11803	8,86
4	11921	11911	11913	11915	5,21	11921	11911	9,96
5	12013	12008	12008	12010	2,85	12013	12008	5,24
6	12119	12114	12116	12116	2,73	12119	12114	5,46
7	12219	12216	12217	12217	1,33	12219	12216	2,49
8	12314	12315	12317	12316	1,58	12317	12314	2,97
9	12411	12411	12412	12411	0,62	12412	12411	1,21
10	12519	12518	12518	12518	0,24	12519	12518	0,47
11	12608	12608	12609	12609	0,53	12609	12608	1,05
12	12699	12693	12703	12699	4,82	12703	12693	9,59
13	12803	12798	12799	12800	2,67	12803	12798	5,02
14	13555	13555	13555	13555	0,29	13555	13555	0,55
15	13339	13341	13341	13340	1,31	13341	13339	2,35
16	13120	13119	13118	13119	0,62	13120	13118	1,21
17	12906	12902	12903	12904	2,31	12906	12902	4,45
18	12679	12679	12679	12679	0,19	12679	12679	0,33
19	12458	12459	12458	12458	0,51	12459	12458	1,02
20	12226	12225	12225	12226	0,58	12226	12225	1,05
21	11994	11993	11995	11994	0,89	11995	11993	1,77
22	11763	11765	11763	11763	1,29	11765	11763	2,25
23	11522	11523	11519	11521	2,01	11523	11519	3,49
24	11272	11274	11276	11274	2,21	11276	11272	4,38
25	11048	11046	11050	11048	2,16	11050	11046	4,31
26	10803	10804	10804	10803	0,49	10804	10803	0,91

6.5.5.3 Plankonvexní destička

Výše uvedená měření byla provedena také pro etalon plankonvexní destičky a opět s podobnými výsledky, jako u etalonu klínové destičky, Obr. 6.42, Obr. 6.43 a Tab. 6.8. Etalon v poloze B byl mezi polohami otáčen.



Obr. 6.42 Zobrazení výsledků průměrných (a) tloušťek a (b) vzdáleností 1 plankonvexní destičky pro jednotlivé body ve 3D grafu, osy x , y a z v mm



Obr. 6.43 Zobrazení výsledků (a) průměrných tloušťek a (b) vzdáleností 1 pro opakovaná měření etalonu plankonvexní destičky a po posunutí měřených bodů v řídicí jednotce robotu do polohy A a B

Tab. 6.8 Výsledky měření etalonu plankonvexní destičky v poloze A měřených bodů v kříži (posun měřených bodů v řídicím systému robotu), vzdálenost 1 [μm]

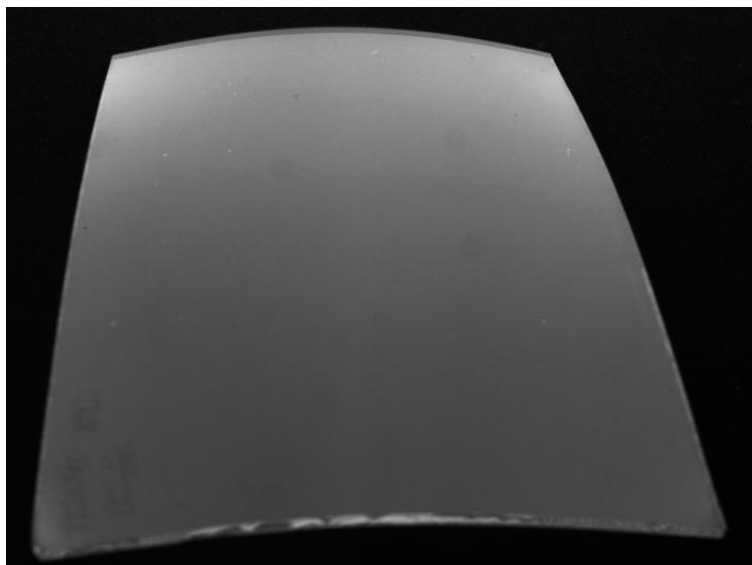
Bod měření	Poloha bodů měřeného kříže A					
	2 měření		Prům.	Std	Min	Max
1	12617	12615	12616	1,68	12617	12615
2	11883	11877	11880	4,13	11883	11877
3	11261	11259	11260	1,59	11261	11259
4	10773	10766	10769	4,92	10773	10766
5	10428	10424	10426	2,91	10428	10424
6	10248	10250	10249	1,33	10250	10248
7	10224	10221	10223	1,67	10224	10221
8	10359	10354	10357	3,64	10359	10354
9	10642	10642	10642	0,55	10642	10642
10	11097	11097	11097	0,19	11097	11097
11	11677	11671	11674	4,22	11677	11671
12	12379	12384	12381	3,70	12384	12379
13	13184	13183	13184	0,60	13184	13183
14	12894	12891	12893	2,24	12894	12891
15	12150	12150	12150	0,23	12150	12150
16	11490	11488	11489	1,74	11490	11488
17	10951	10953	10952	1,42	10953	10951
18	10560	10558	10559	1,27	10560	10558
19	10312	10313	10312	0,68	10313	10312
20	10229	10228	10229	0,54	10229	10228
21	10305	10305	10305	0,27	10305	10305
22	10542	10540	10541	1,44	10542	10540
23	10921	10923	10922	0,95	10923	10921
24	11442	11443	11442	0,52	11443	11442
25	12115	12114	12115	0,50	12115	12114
26	12876	12882	12879	4,48	12882	12876

Přestože testy nebyly prováděny v desítkách opakovaných testů, lze potvrdit známou skutečnost. Daný model robotu má omezeno přesné polohování v daném bodě až na ± 100 μm v ose z (měření vzdálenosti mezi sklem a konfokálním snímačem). To je dáno mechanickými limitami stroje a odpovídá garanci výrobce robotu (přesnost polohování je podobná pro všechny tři osy). Na druhou stranu opakovatelnost měření (najetí na stejný bod se stejnou chybou) je u tohoto typu robotu celkem vysoká, o řád vyšší než u polohování. Lze tak využít etalonů pro zjištění aktuální polohy snímací hlavičky a zvýšit přesnost měření.

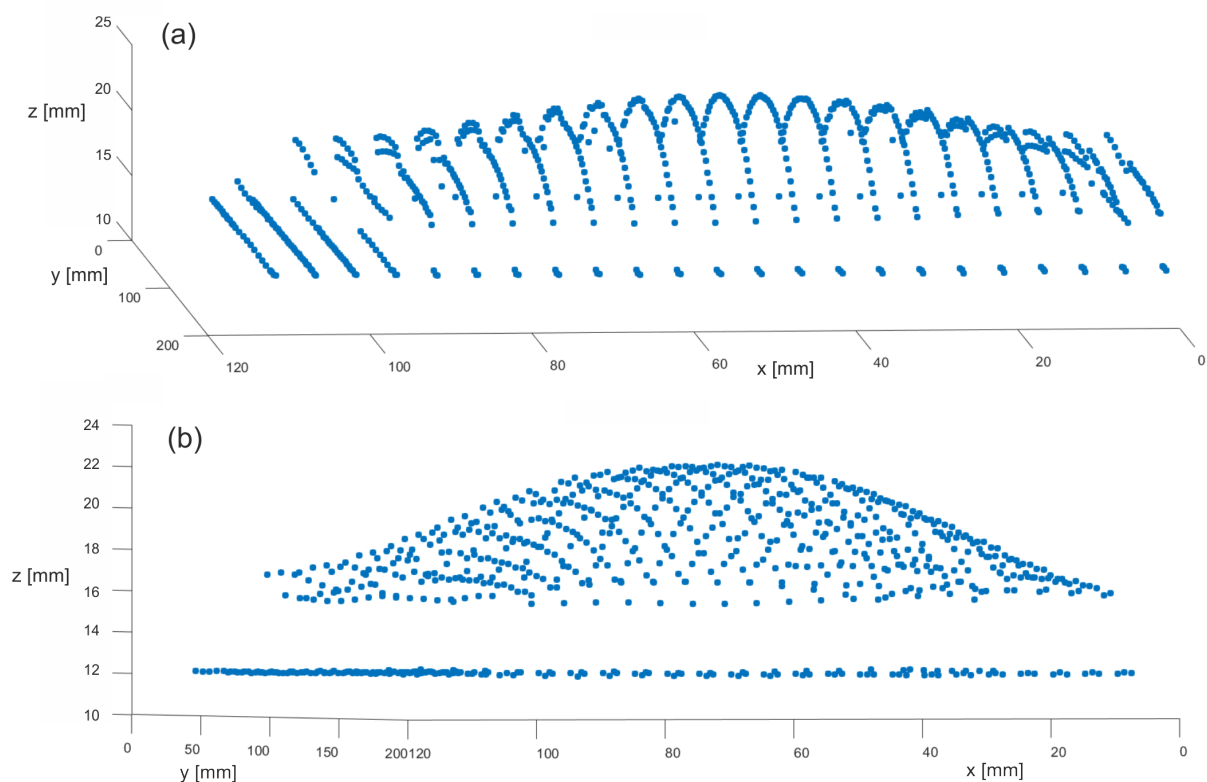
6.5.6 Testování možností zpracování výstupních dat ze snímačů

Jak již bylo uvedeno výše, z naměřených bodových dat je možné sestavit 3D model. Na Obr. 6.44 je snímek gravitačně tvarovaného sklíčka, který byl proměřen maticově v 782 bodech (23 x 34 bodů s posunem 5 mm do osy x a y). Obr. 6.45 zobrazuje matici

naměřených bodů, jako podklad pro následné získání 3D modelu. Tento model bude zatížen jak výše uvedenými chybami v ose měření konfokálního snímače (v ose z), tak i ve zbývajících dvou osách (x a y).



Obr. 6.44 Gravitačně tvarované sklíčko o rozměrech 100 x 150 mm



Obr. 6.45 Získaná matice jako podklad pro 3D model gravitačně tvarovaného malého plochého skla, vzdálenost 1, graf v různých polohách natočení, osy x , y a z v mm

6.5.7 Závěr kapitoly a potenciál využití konfokálních snímačů pro bezkontaktní detekci automobilových skel

Kapitola představila především současný stav nabízených parametrů snímačů a jejich potenciál využití v průmyslové praxi. Uvedené výsledky ověření vlastností a vlivu okolí na výsledky ukazují potenciál využití konfokálních snímačů. Jejich využití je limitováno především relativně malým rozsahem měření, malými odklony normály měřeného povrchu od osy snímače, zvoleným polohovacím zařízením, které vnáší omezení v přesnosti měření.

Výzkum byl dále zaměřen na získání dat, která by mohla být použita pro vytváření 3D modelů, které následně budou porovnány s CAD modelem nebo etalonem. Jak se prokázalo, polohovací zařízení ve formě angulárního robotu má své reálné limity. Z analýzy výsledků vyplývá, že přesnost polohování daného robotu je pouze do 200 μm . Nicméně pro opakované najetí robotu do stejného bodu je přesnost o řád vyšší.

Výzkum je primárně zaměřen na náhradu současných testů přesnosti tvaru automobilových skel na maketách vyrobených gravitačním tvarováním plochého skla. Tato náhrada drahých a na skladování náročných maket je ekonomicky velmi zajímavá a pro výrobce automobilových skel lákavá. Cílem je 100 % kontrola, která je často vyžadována výrobcí automobilů. V současné době ovšem na trhu neexistuje spolehlivé řešení, které by umožňovalo bezkontaktní odměřování a vedlo by k úsporám za výrobu, skladování a provoz maket. Jedná se o komplexní záležitost, která je spojena s požadavkem relativně vysoké přesnosti odměřování (ideálně v setinách mm), vysoké míry spolehlivosti a v neposlední řadě i rychlosti. Během několikasekundového cyklu je třeba zvládnout manipulaci s měřeným výrobkem do měřicího zařízení, provést měření desítek bodů, jejichž počet může přesáhnout 100 a měření vyhodnotit.

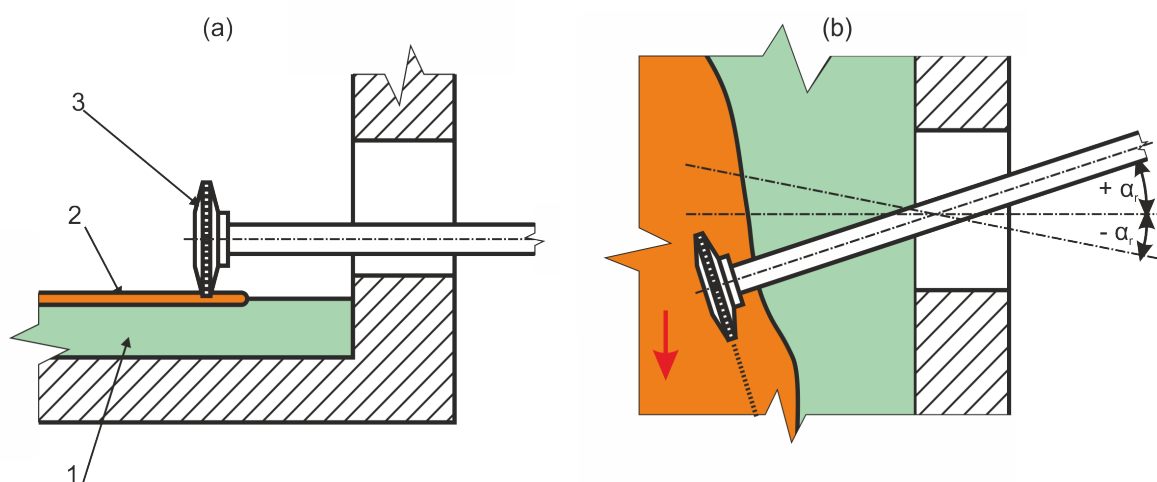
Testování potenciálu konfokálních snímačů z hlediska přesnosti a závislosti na okrajových podmínkách ukázalo, že nutnou podmínkou pro nasazení konfokálních snímačů je zajištění přesného polohování snímací hlavičky. Experimenty provedené na vytvořeném testovacím standu s použitým kloubovým robotem neumožnily požadovanou přesnost dosáhnout. Další nutnou podmínkou je zajištění rychlejšího odměřování. Nyní je možné provést jedním konfokálním snímačem 40 až 60 měření za minutu, což je pro nasazení zařízení on-line in-line nedostatečné. Bude nutné měřicí stand na lince koncipovat pro současné odměřování více snímacích hlavic, a to s možností umístění na několika paralelních ultrapřesných robotech. Případně je nutné zvolit jinou strategii, která použije několik konfokálních snímačů najednou.

Této problematice se dlouhodobě věnuje tým katedry. Výsledky již vedou k uplatnění zařízení na výrobní lince výrobce autoskel. Vzhledem k aktuálnosti problematiky a ochraně duševního vlastnictví zde další podrobnosti nejsou sděleny.

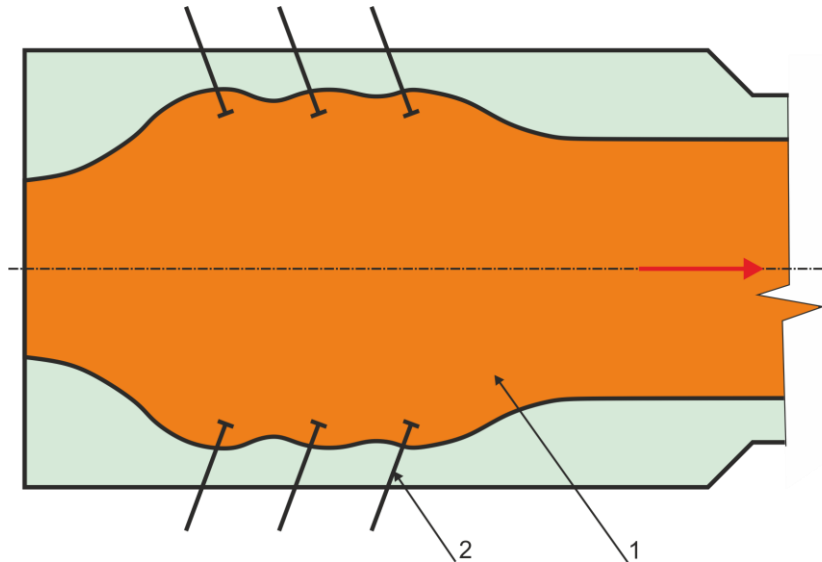
6.6 Příklad aplikace: možnosti detekce bortů plaveného skla na výrobní lince

Výroba plochého skla technologií FLOAT (plavením na cínové lázni) je velmi komplexní technologií a je popsána v odborné literatuře [13, 122]. Kontrolou plochého skla vyrobeného technologií FLOAT se zabývala kap. 5.2, jako polotovar se takto vyrobené sklo používá pro výrobu autoskel, kde je zvažována kontrola pomocí konfokálních snímačů kap. 6.5.7.

Při výrobě plochého skla technologií FLOAT probíhá samotné tvarování pásu skla na cínové lázni, ale jeho tloušťka je dána výslednicí rovnováhy, která se ustálí mezi gravitační silou a silou povrchového napětí (na rozhraní skloviny a cínu a skloviny a pecní atmosféry) vyvolávající tah směrem dovnitř. Tato rovnovážná tloušťka je u běžného složení skloviny kolem 6 mm. Pokud by se rychlost odtahu skloviny z cínové lázně zvýšila, výsledkem by bylo zmenšení šířky pásu, ale nikoliv tloušťky skla. Při výrobě jiné tloušťky než je tloušťka rovnovážná, se používají vodou chlazené otočné kovové rolny s drážkovanými okraji, které pás skla na cínové lázni roztahují (menší tloušťka pásu) nebo shrnují (větší tloušťka pásu), Obr. 6.46 a Obr. 6.47. Po vychlazení skla, případně jeho mytí, detekci vad, následuje dělení skla, při kterém je prováděn „podélný řez“ [122]. Ten od tabule odděluje okraje, tzv. borty, kde jsou otisky roln a sklo je od tvarování deformováno (není zde zajištěn požadavek konstantní tloušťky). V průběhu výroby dochází ke změnám v absolutní pozici počátku bortů a je nutné ji i několikrát denně stanovit pro nastavení podélného řezu. Pozice naškrábnutí pro podélné dělení je v současné době nastavována manuálně operátorem na základě průběžně odebraných a off-line vyhodnocených odřezů okraje pásu skla. Samozřejmě šíře pásu musí být zachována, posunutí naškrábnutí musí být proto prováděno z obou stran pásu. Cílem testů bylo navrhnout možnosti on-line detekce bortů.



Obr. 6.46 Ovlivnění šířky pásu skla pomocí kovových drážkovaných roln, (a) umístění rolny (bokorys), (b) polohy a nastavení rolny (půdorys), 1 – tavenina cínu, 2 – sklovina, 3 – rolna chlazená vodou, $+\alpha_r$ – menší tloušťka pásu (roztahování), $-\alpha_r$ – větší tloušťka pásu (shrňování), [13]



Obr. 6.47 Použití tří párů roln při snižování tloušťky pásu (pohled shora): 1 – pás skla, 2 – kovové rolny, [13]

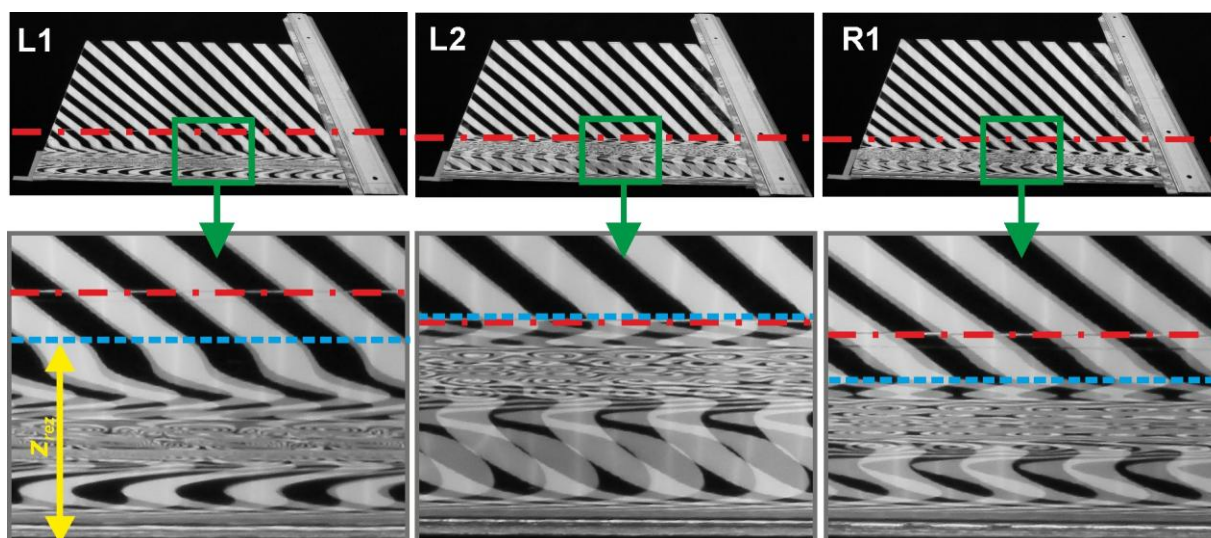
Text vychází z článku [72] a prezentované výsledky jsou uvedeny také v disertační práci [5].

6.6.1 Detekce pomocí odrazu světelné zebra-desky od povrchu skla

Optická kvalita plochého skla je dnes běžně stanovena operátorem off-line v temné místnosti přímo u linky. Znamená to, že na lince je vzorek skla napříč pásem vyříznut, přenesen do provozní laboratoře vedle linky a v temné místnosti testován. Čas odběru vzorků je dán plánem, v případě problémů s jakostí je kontrola prováděna častěji. Analýza je zaměřena především na světelnou propustnost, distorzi skla (zkreslení geometrie sledovaného objektu po průchodu sklem) a reflexi skla.

Současná off-line kontrola okrajů (počátků bortů) probíhá v temné místnosti pomocí odrazu světelné zebra-desky s černými pruhy o šíři 25 mm svírajícími úhel 45°. Pro testování v rámci projektu byly použity tři vzorky o rozměrech 300 x 300 mm, tloušťky 3,8 mm. Ukázky deformace jsou uvedeny na Obr. 6.48, naškrábnutí pro následné podélné odlomení je označeno červeně čerchovaně, pozice počátku deformace je označena modře čárkovaně. U vzorku L2 je naškrábnutí již za hranicí deformace a bylo nutné řez posunout směrem ke středu pásu. Vyznačená vzdálenost z_{rez} označuje požadovanou vzdálenost pro detekci počátku deformace od okraje skla. Specifikace a základní ověření možnosti stanovení vzdálenosti z_{rez} byly cílem těchto experimentů.

Počátek deformace je možné také určit na základě automatické detekce zvlnění odrazu zebra-desky pomocí analýzy obrazu. Mohlo by jít o úpravu algoritmu tzv. corrugation testu, kap. 5.2. Analýzu by bylo možné přenést na linku a provádět hodnocení okraje on-line, kap. 5.2.8.



Obr. 6.48 Odraz zebra-desky od přířezu okraje skla s borty, červeně čerchovaně je vyznačeno místo naškrábnutí pro podélné dělení, modře čárkovaně je vyznačen počátek deformace (snímky nebyly pořízeny přesně v souladu s používanou metodikou v provozních laboratořích) [72]

6.6.2 Detekce pomocí konfokálních snímačů

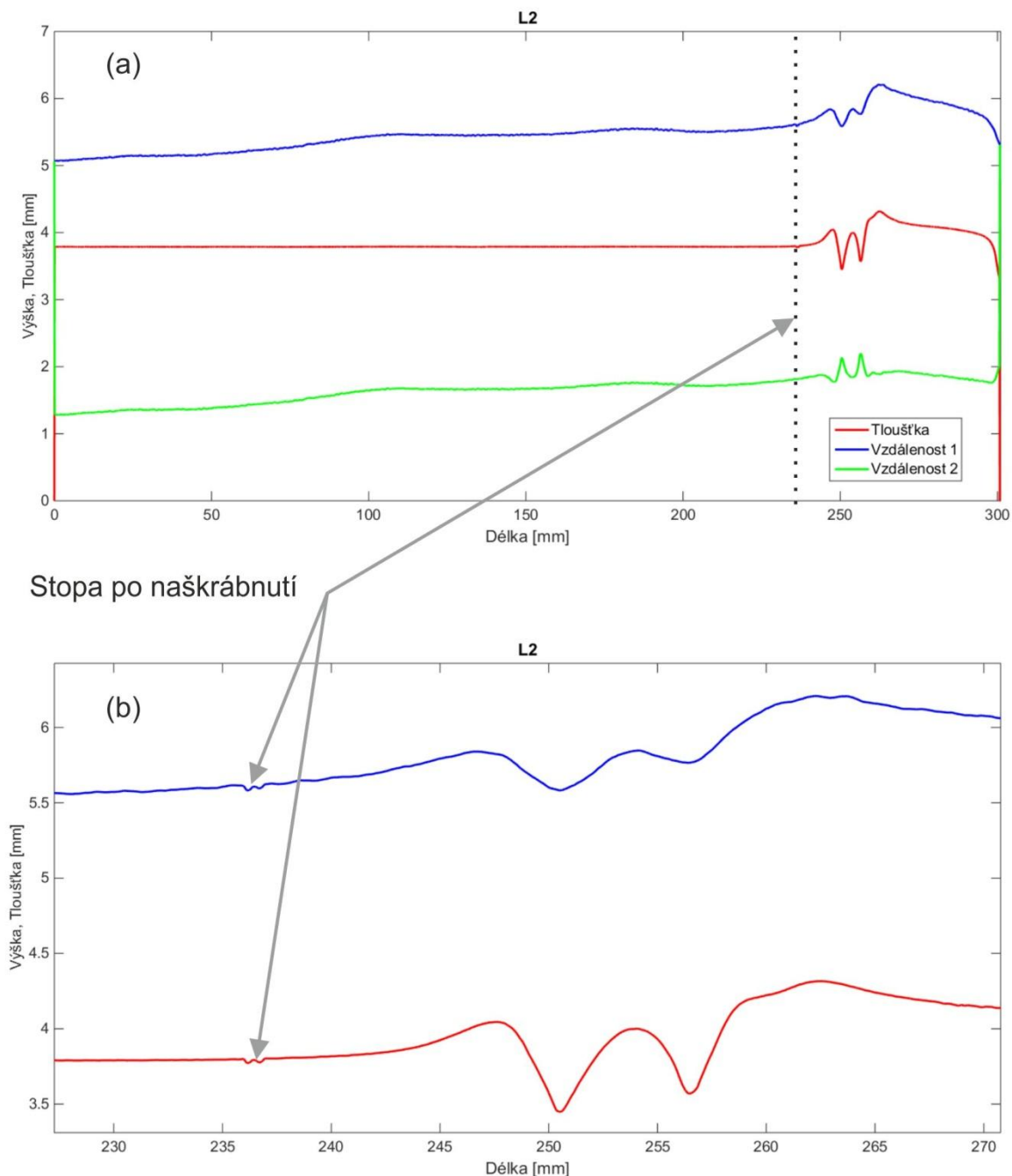
Konfokální snímače byly popsány v kap. 3.1.7.5 a možné použití pro detekci skla popsáno v kap. 6.5. Relativně malý rozsah měření konfokálních snímačů (do 42 mm) je v tomto případě pro běžné tloušťky skla dostatečný. Komplikací pro tuto aplikaci je omezení v podobě bodového měření, případně ve velmi krátké linii (několika mm). Pro tuto aplikaci je tak nutné vyvinout přesné polohovací zařízení, které umožní příčný pohyb nad sledovanou částí pásu, s přesným odměřováním polohy snímací hlavy.

Na pracovišti pro testování bezkontaktních technologií (kap. 6.5.2) bylo provedeno proměření vzorků. Ukázka získaného průběhu naměřených dat je uvedena na Obr. 6.49. Na obrázku (a) jsou zobrazeny tři získané profily: vzdálenosti od vrchní strany skla (vzdálenost 1), vzdálenosti od spodní strany skla (vzdálenost 2) a získaná tloušťka skla (tloušťka = vzdálenost 2 - vzdálenost 1). Na obrázku (b) je detail získaného profilu tloušťky na okraji skla. Jak je patrné, konfokální snímač byl schopen detekovat i místo po naškrábnutí.

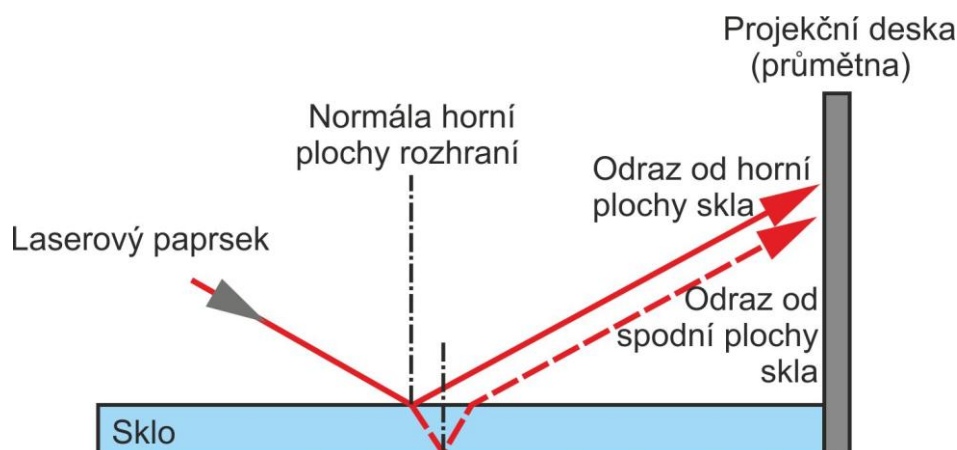
6.6.3 Detekce pomocí projekce odraženého laserového paprsku

V současné době existují metody pořízení 3D modelu, které využívají promítání laserového paprsku ve formě linie, kap. 4.4.1.2. Standardní metody získání 3D obrazu jsou ovšem založené na detekci profilu, který se odráží od povrchu sledovaného objektu, ideálně se jedná o difúzní povrch. Pro zrcadlové nebo lesklé povrchy jsou metody mnohem komplikovanější a pro transparentní materiály již popsané metody nelze použít. Možností je u materiálů s odrazivým povrchem, jako je sklo, využít odrazu laserového paprsku promítnutého na projekční desku, Obr. 6.50. Lze tak využít větší odrazivosti povrchu skla při

dostatečně velkém úhlu dopadu paprsku θ_i , kap. 3.1.7.2. Použity byly úhly nad 45° , čemuž odpovídá koeficient odrazivosti R 9,2 % pro polarizované záření v rovině kolmé. (Využití odrazu světla od povrchu skla se již autor této práce také věnoval [17].)



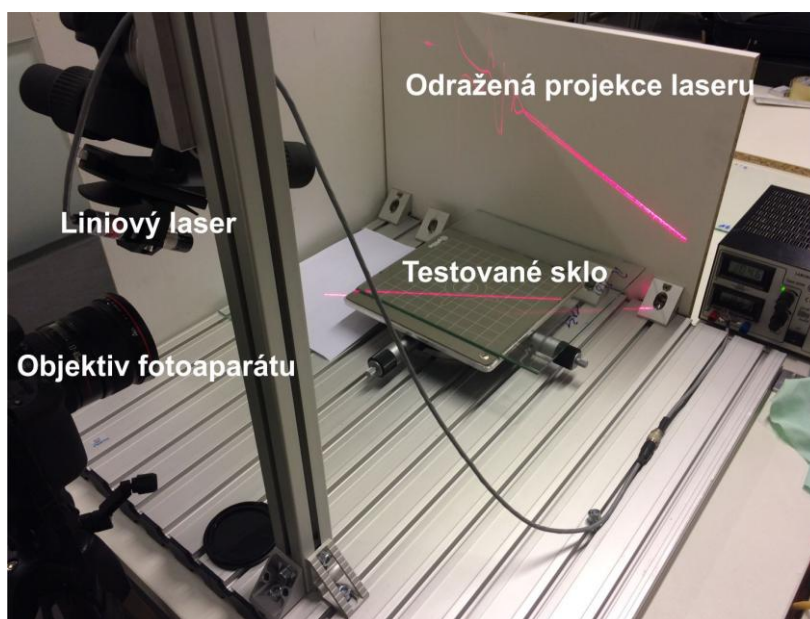
Obr. 6.49 Získané profily z konfokálního snímače: (a) celý proměřený profil tloušťky, vzdálenost 1 a vzdálenost 2, (b) zvětšená část profilu tloušťky a vzdálenosti 1



Obr. 6.50 Zjednodušený princip detekce pomocí odrazu laseru [72]

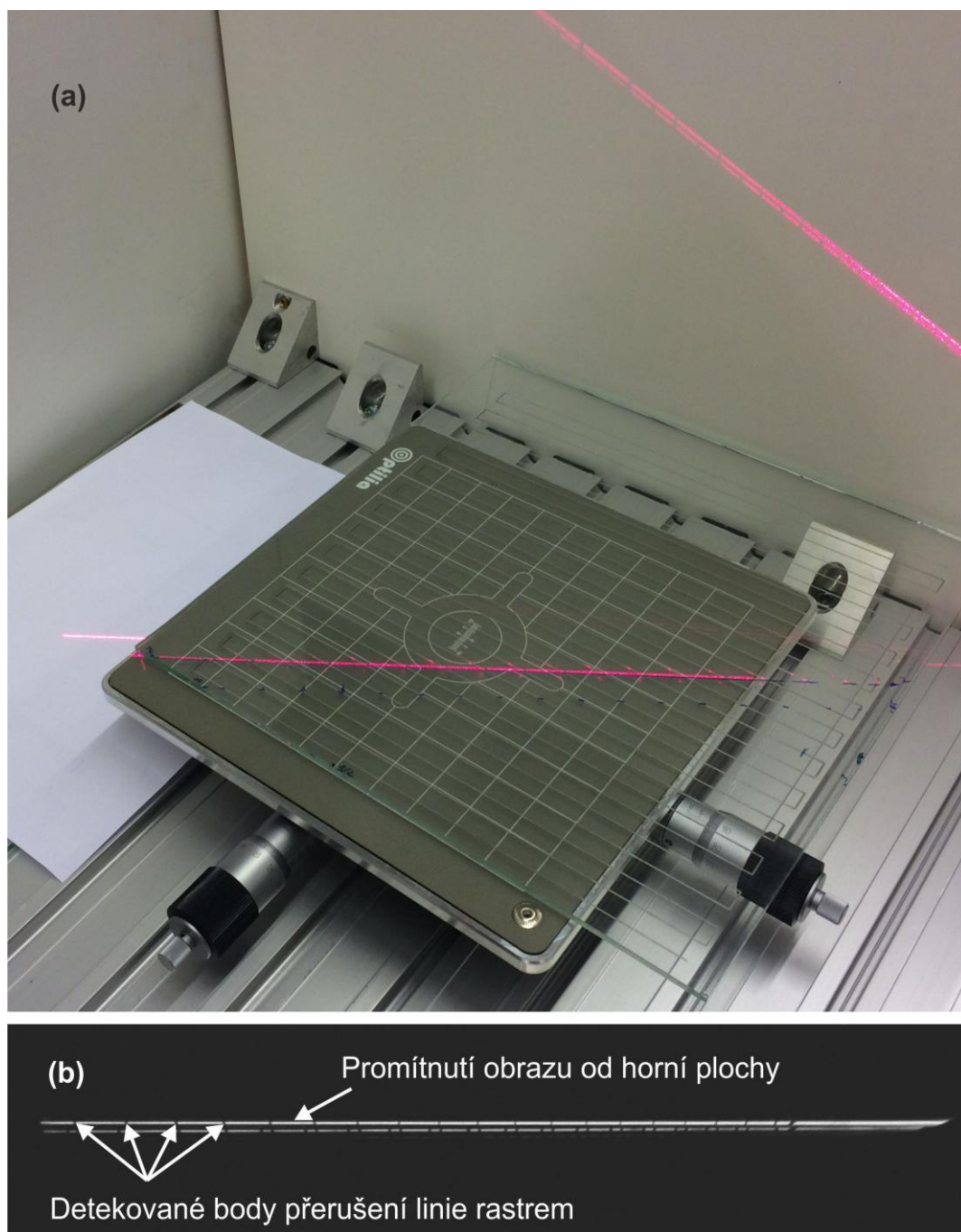
Tento princip je jednoduchý, ale vede ke komplikovaným vztahům sloužícím k přepočtu na 3D virtuální model. Metoda je také velmi citlivá na přesné uspořádání všech prvků v tomto optickém systému (kamera, laser, projekční deska, sledovaný objekt ze skla), dále je citlivá na vibrace a v současném stavu také na okolní světelné rušení. To vše je otázkou dalšího výzkumu. Nicméně, metodu lze relativně snadno využít v uvedené problematice detekce bortu pro detekci změny tvaru (případně i tloušťky) skla. Lze totiž předpokládat, že získaná informace o počátku změny požadovaného tvaru (tloušťky) je pro dané řešení postačující, tedy bez nároků na přesné změření tvaru bortu. Důležitou informací tak zůstává pozice počátků změn a na tuto problematiku je tento experiment zaměřen.

V tomto textu je uvedeno vyhodnocení deformace horní plochy strany skla. Pro statické testování metody bylo postaveno jednoduché stacionární experimentální pracoviště, Obr. 6.51. Laserový paprsek je promítán pod úhlem 45° vůči sledovanému vzorku skla. Volba úhlu a uspořádání byla provedena na základě experimentů a možností pracoviště, nicméně v této oblasti je plánován další výzkum.



Obr. 6.51 Stacionární testy odrazu liniového laseru od povrchu skla, první přibližné testy [72]

Vzhledem k tomu, že se ukázalo jako komplikované pomocí přepočtů exaktně stanovit ideální tvar, a to i s ohledem na obtížně udržitelnou přesnost konstrukce celého zařízení, bylo použito kalibračního vzorku (etalonu). Cílem tohoto řešení je zahrnout v přepočtech již nepřesnosti nastavení pracoviště a relativně rychle získat potřebné vztahy pro dostatečně přesné stanovení pozice změny tvaru skla u bortů. Jako kalibrační vzorek byl použit přířez plochého skla tloušťky 3,8 mm s ověřenou rovinností pomocí konfokálního snímače. Na přířez byly laserem vypáleny linie s přesností $\pm 0,1$ mm. Snímek kalibračního vzorku a detekovaných odražených linií je na Obr. 6.52.



Obr. 6.52 Kalibrační vzorek: (a) pohled na osvětlený vzorek, (b) odražené a promítnuté linie od vrchní a spodní plochy kalibračního vzorku, získáno z odladěného pracoviště [72]

Horní a intenzivnější linie reprezentuje odraz od horní plochy, spodní a slabší linie od spodní plochy kalibračního vzorku. Horní odražená linie je přerušována vypálenými liniemi. Při daném nastavení tak přerušení linie vytváří 22 bodů, pro které byl pomocí metody nejmenších čtverců vytvořen matematický model pro vzdálenostní přepočít, Obr. 6.52 (a).

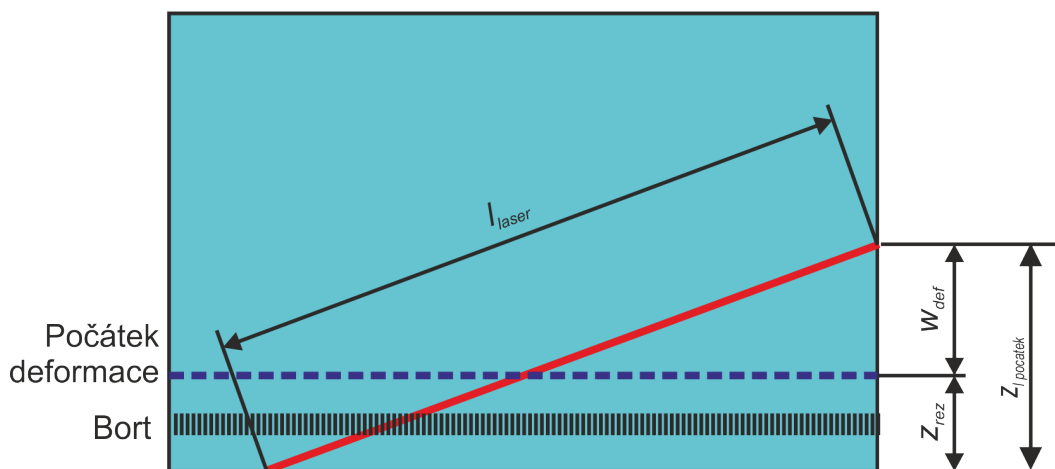
Se znalostí rovnice závislosti odražené linie je možné určit délku do počátku zdeformované části. Z odrazu laserové linie je však složité určit okraj/hranu skla, od kterého je nutné deformaci měřit (pro tento účel je třeba softwarový nástroj detekce okraje skla vyvinout). Z tohoto důvodu bylo měření prováděno od pevně stanoveného počátku v nedeformované části přířezu. Tato pozice byla díky fixnímu uspořádání pracoviště a neměnné poloze skla stejná pro všechny analyzované vzorky a kalibrační standard. Začátek promítané linie byl umístěn do pevné vzdálenosti $z_{l\text{ pocatek}} = 188\text{ mm}$ od okraje přířezu skla, Obr. 6.53.

Byl připraven jednoduchý software ke zjištění délky zdeformované části skla. Skript analyzuje odraženou linii a vyhodnocuje délku rovné části linie od počátku až po zdeformovanou část. Takto získaná délka linie w_{def} (v pixelech) je poté přepočtena na kolmou vzdálenost od okraje přířezu skla z_{rez} (v mm) na základě empiricky odvozeného vzorce v [5], Obr. 6.53:

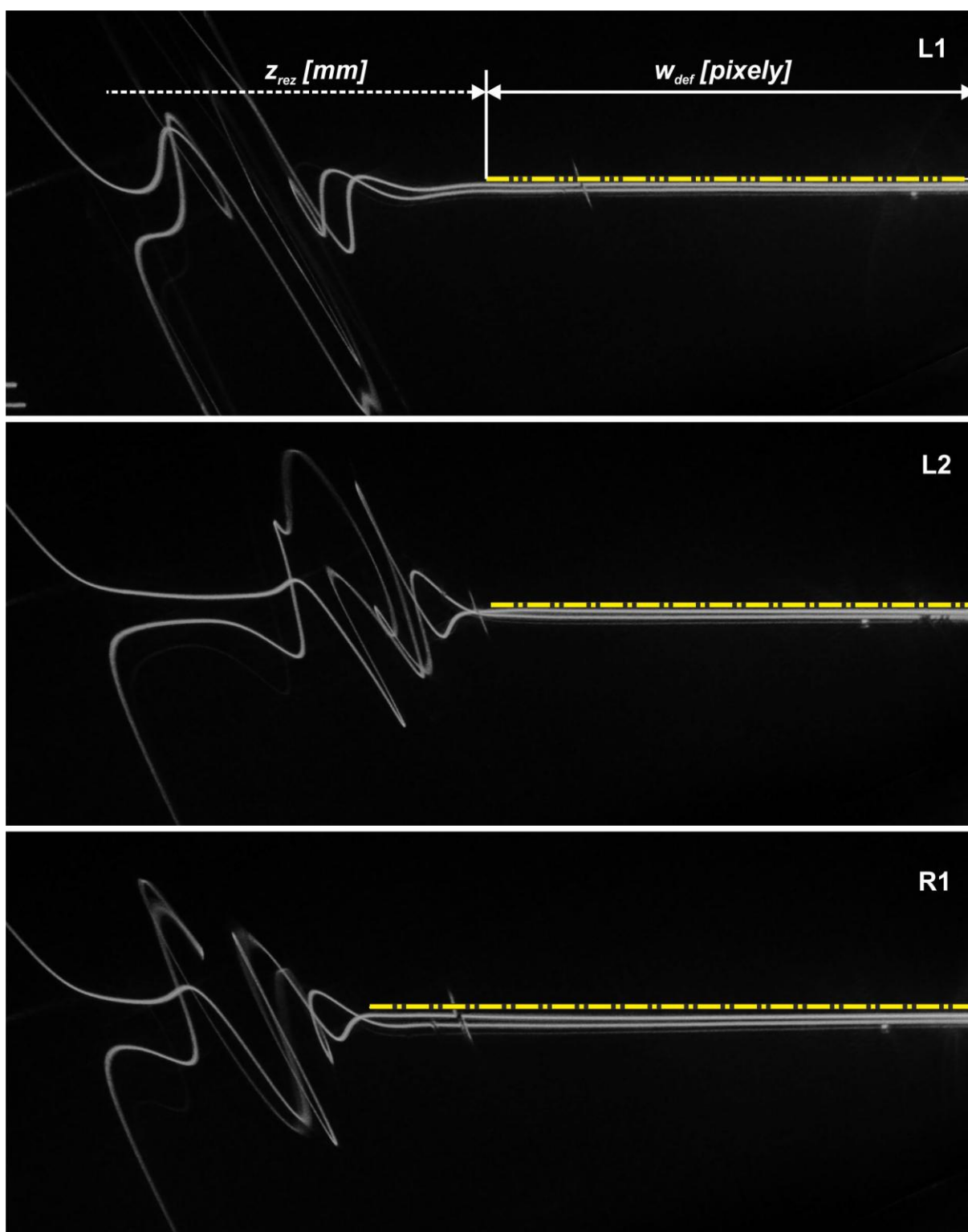
$$z_{rez} = z_{l\text{ pocatek}} - (0,0000078 w_{def}^2 - 0,078 w_{def} + 186,36) \quad (6.2)$$

$z_{l\text{ pocatek}}$ je vzdáleností mezi počátkem přířezu a laserovým paprskem (Obr. 6.53), z_{rez} je šířka bortu, která má být odstraněna v mm. Jedná se o kvadratickou rovnici, což je způsobeno promítáním liniového paprsku z úzké linie, která se postupně rozšiřuje, dopadá na plochu skla, je následně odrážena a zobrazena na projekční ploše pod úhly v prostoru. Dále byl vypočten koeficient determinace $R_{det}^2 = 0,9998$, který ukazuje, že model je vhodný pro aproximaci naměřených dat. Tato rovnice se bude měnit se změnou umístění a úhlu laseru a pozicí kamery. Kalibraci je tak vhodné automatizovat. I v této oblasti bude prováděn výzkum.

Promítnuté odražené křivky u analyzovaných vzorků jsou spolu s detekcí počátku deformace od okraje vzorku zobrazeny na Obr. 6.54.



Obr. 6.53 Projekce laserové linie na horní plochu analyzovaného přířezu skla [72]

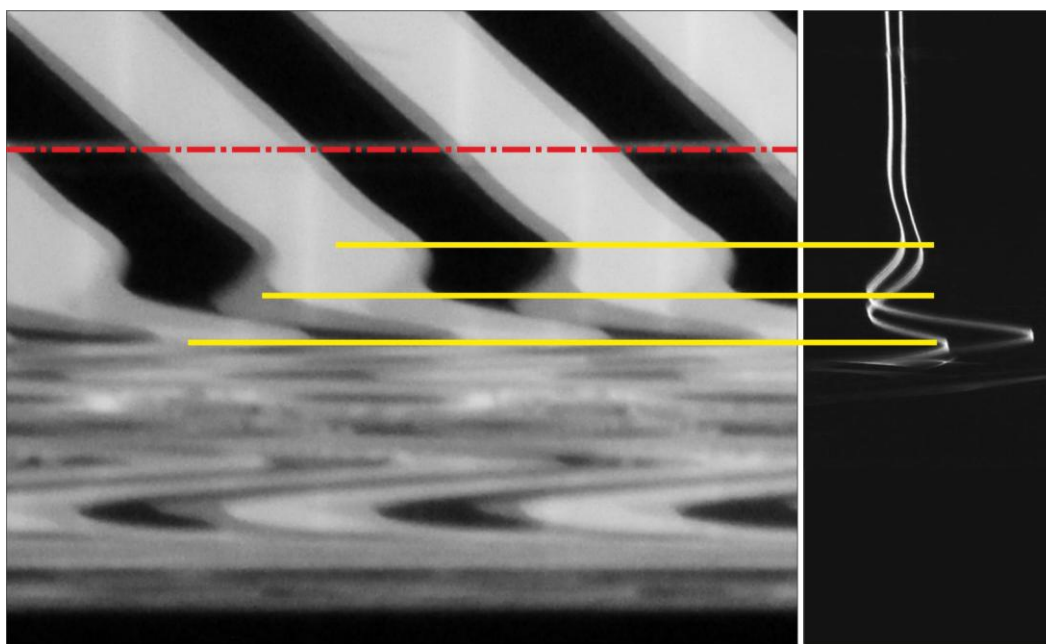


Obr. 6.54 Odražené křivky spolu s detekcí počátku deformace pro vzorky L1, L2, R1 [72]

6.6.4 Porovnání výsledků

Získané výsledky z jednotlivých metod měření byly následně v této práci stanoveny subjektivně, ale je možné připravit softwarové nástroje pro automatickou detekci změny tvaru pásu skla nesplňující jakost. U detekce pomocí odrazu světelné zebra-desky od povrchu skla lze upravit software pro výpočet corrugation testu (kap. 5.2). Detekce pozice změny u laseru a konfokálního snímače lze provést softwarovým nástrojem na základě změny křivky o stanovenou procentuální změnu její pozice.

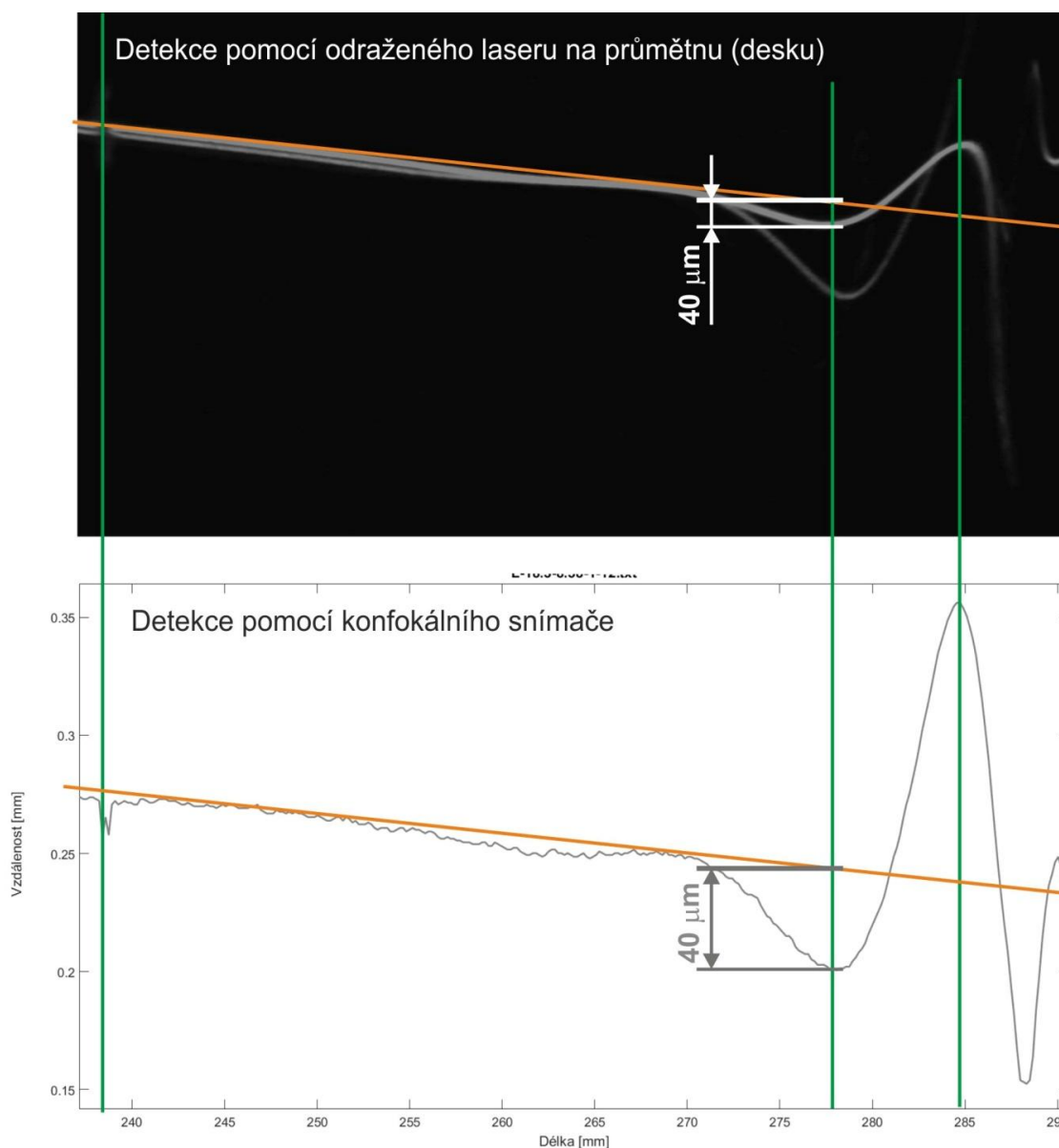
Na Obr. 6.55 je uvedeno obrazové srovnání metody se světelnou zebra-deskou a laserem pro vzorek L1. Na Obr. 6.56 je pak uvedeno porovnání projekce odraženého laserového paprsku a měření konfokálním snímačem pro vzorek L1. Na základě obou porovnání lze konstatovat velmi dobrou vizuální shodu mezi těmito metodami. Číselně jsou výsledky měření uvedeny v Tab. 6.9. Výsledky z konfokálního snímače jsou, vzhledem k vysoké přesnosti, brány za základ. Dobrá číselná shoda je patrná mezi projekcí laserového paprsku a konfokálním snímačem. V případě odrazu zebra-desky lze chybu přičíst subjektivnímu posouzení vzdálenosti.



Obr. 6.55 Porovnání metody odrazu světelné zebra-desky od povrchu skla a projekce odraženého laserového paprsku pro vzorek L1 [72]

Tab. 6.9 Vzdálenosti deformovaného okraje od hrany pásu získané třemi použitými přístupy

Vzorek	Laserová projekce [mm]	Zebra test [mm]	Konfokální senzor [mm]
L1	60,7	63	61,1
L2	69,5	70	69,6
R1	46,7	50	47,1



Obr. 6.56 Porovnání projekce odraženého laserového paprsku a měření konfokálním snímačem pro vzorek L1 [72]

6.6.5 Možnosti automatizace uvažovaných přístupů

Všechny tři uvažované přístupy mají potenciál na automatické vyhodnocení počátku bortů. Vzhledem k nárokům na kontrolu v praxi pouze několikrát během dne, nejsou rozhodující ani časy potřebné k získání dat a následně jejich interpretaci. Ve všech případech bude možné získat relevantní informace o pozici bortu od vteřin po jednotky minut. Nutné bude vyřešit samotné technické provedení, které může být pro různé metody rozdílně technicky a finančně náročné.

V případě použití zebra-desky bude nutné se vypořádat se vzdálenostmi mezi projekční zebra-deskou a kamerou, případně provést implementaci do on-line corrugation testu. Při

využití detekce laserové projekce je důležité uvažovat s minimalizací vzdáleností za účelem zmenšení zařízení. U obou přístupů je zároveň nezbytné řešit tloušťku skla, která při detekci svrchu při větších rozdílech bude měnit vzorec pro přepočet z pixelů na mm. Metoda detekce bortu konfokálními snímači je limitována zajištěním přesného polohování senzoru nad sklem (zajištění příčného posuvu nad sledovanou částí skla) a zajištěním přesného odměřování polohy snímací hlavičky. U všech způsobů je nezbytné vyřešit minimalizaci vibrací a stínění celého zařízení od okolního světelného rušení.

6.6.6 Závěr kapitoly

Detekce bortů skla při výrobě plaveného plochého skla je důležitou kontrolou, která je prováděna jen po několika hodinách (často 6 hodin a více). V rámci výzkumu se podařilo specifikovat automatické rozpoznání deformovaného okraje pomocí 3 metod: odraz zebra-desky od povrchu skla, měření pomocí pohybujícího se konfokálního snímače nad okrajem pásu skla, projekce odraženého laserového paprsku od povrchu skla. Všechny tři metody jsou dostatečně přesné a technicky proveditelné pro detekci bortů přímo na výrobní lince. Poslední uvedená metoda je dále potenciálně použitelná pro detekci tvaru skla, například autoskel. Výzkum v této oblasti pokračuje a s ohledem na možnou patentovou ochranu zde nejsou současné výsledky výzkumu dále podrobněji rozepisovány.

Tato část práce také potvrdila možnosti využití přístupu ke sklu jako k materiálu s lesklým povrchem. Oproti „běžnému“ lesklému povrchu, je ale nutné použít relativně velkých úhlů dopadu paprsků na povrch od normály.

6.7 Detekce výrobků s lesklým povrchem

Pojem lesklý povrch byl již definován v kap. 3.1.7.1. Obecně platí, že snímání objektů s lesklým povrchem je značně problémové (kap. 4.4.1.2). K odrazu dochází pouze v určitých směrech a nelze tak použít běžné metody snímání, případně je nutné tyto metody pro snímání lesklých povrchů náležitě upravit. Tyto objekty jsou dále zatíženy parazitními reflexemi od jiných (obecných) zdrojů světla, což opět komplikuje úspěšnou detekci objektů. Nejčastějším způsobem, používaným v praxi, je úplné zastínění sledovaného objektu proti vnějšímu osvětlení a následné přesné naladění geometrie kamery a osvětlovačů. Takovéto nastavení ale není vhodné pro jiné typy objektů a při mírné změně vlastností povrchů již snímání obrazových dat nemusí být spolehlivé, kompletní nebo ho již nelze provést.

Lesklými povrchy se zabývá práce [5] a jak vyplývá z její rešerše, pak častým řešením je získání velkého množství obrazových dat a následný výběr použitelných dat nezatížených reflexí pomocí vhodného algoritmu. V praxi to znamená rozšíření hardware o další snímače a případně také o zdroje detekované energie (nejčastěji osvětlovače). Možným použitím je také posun mimo VIS do UV a IR záření, kdy se dané povrchy v interakci s vhodným zářením

chovají již jinak.

Na druhou stranu, v některých případech je možné využít lesklosti povrchu pro jeho detekci. To je zejména v případech, že pozadí sledovaného objektu má matný povrch a objekt má lesklý povrch (případně obráceně). Jako příklad je možné uvést detekci držáků na sklo [163], kde držáky byly lesklé (od barvy stříbrné po černou) a povrch skla, na který byly upevněny, naopak matný. Obrazovou analýzou bylo možné nakonec detekovat všechny typy držáků bez změny hardwarových a softwarových parametrů pro každý držák zvlášť.

Příkladem částečně lesklého objektu a jeho detekce je projekt zaměřený na tzv. bin picking (vybírání beden) stříbrného dílu pro montáž automobilů. Jak se prokázalo, tak u tohoto typu povrchu bylo možné nastavit parametry snímačů a osvětlení tak, aby objekt byl detekovatelný.

Prezentované výsledky jsou uvedeny také v disertační práci [5], která vznikala souběžně s touto habilitační prací. Obě práce čerpají z výzkumné zprávy z projektu [G25].

6.7.1 Příklad aplikace: bin picking s lesklými objekty

Aplikace bin picking jsou žádanou aplikací s vysokým potenciálem úspory pracovních sil a s ohledem na sofistikovaný princip řešení je jasným aplikačním prostředkem v rámci realizace záměrů koncepce Průmyslu 4.0 v robotizaci výroby. Problematika vybírání beden je studována již více než 25 let a řešení je již několik let nabízeno výrobcí. Na odborných veletrzích se lze setkat s mnoha ukázkami a je tak navozen dojem již vyřešeného problému. Nasazení bin picking není ovšem v průmyslové praxi zatím příliš rozšířeno. Jak se ukazuje, je třeba překonat a vyřešit několik problémů. Vedle technických je to i cena a s tím spojená návratnost. Z tohoto důvodu je vhodné se touto problematikou zabývat. Autor této práce byl členem týmu, který vybudoval pracoviště pro testování bin picking aplikací [164].

Na této problematice je vedle přístupu k detekci objektů ukázána důležitost vlastní konstrukce, a to především u chapadel, kdy správný návrh vede ke stabilitě, spolehlivosti a snížení nároků (ceny) na přesnost senzorů.

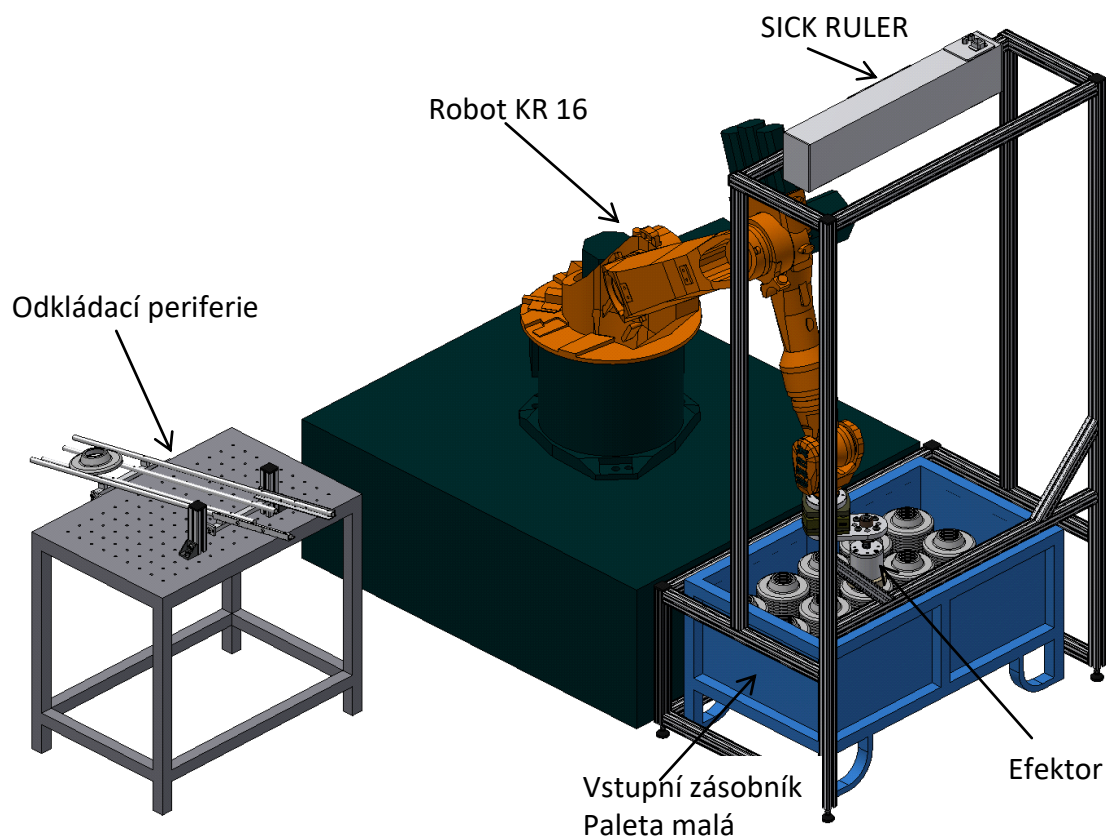
Jedná se o aplikaci, která pro své bezproblémové fungování potřebuje několik správně zvolených, nastavených (naprogramovaných) zařízení, která musí zajistit bezproblémovou komunikaci. Jedná se o:

- robot,
- kamerový systém (případně další senzory) s řídicí jednotkou (většinou na bázi PC),
- efektor (chapadlo),
- periferní zařízení,
- systém osvětlení,
- bezpečnostní prvky,
- komunikace s okolím atd.

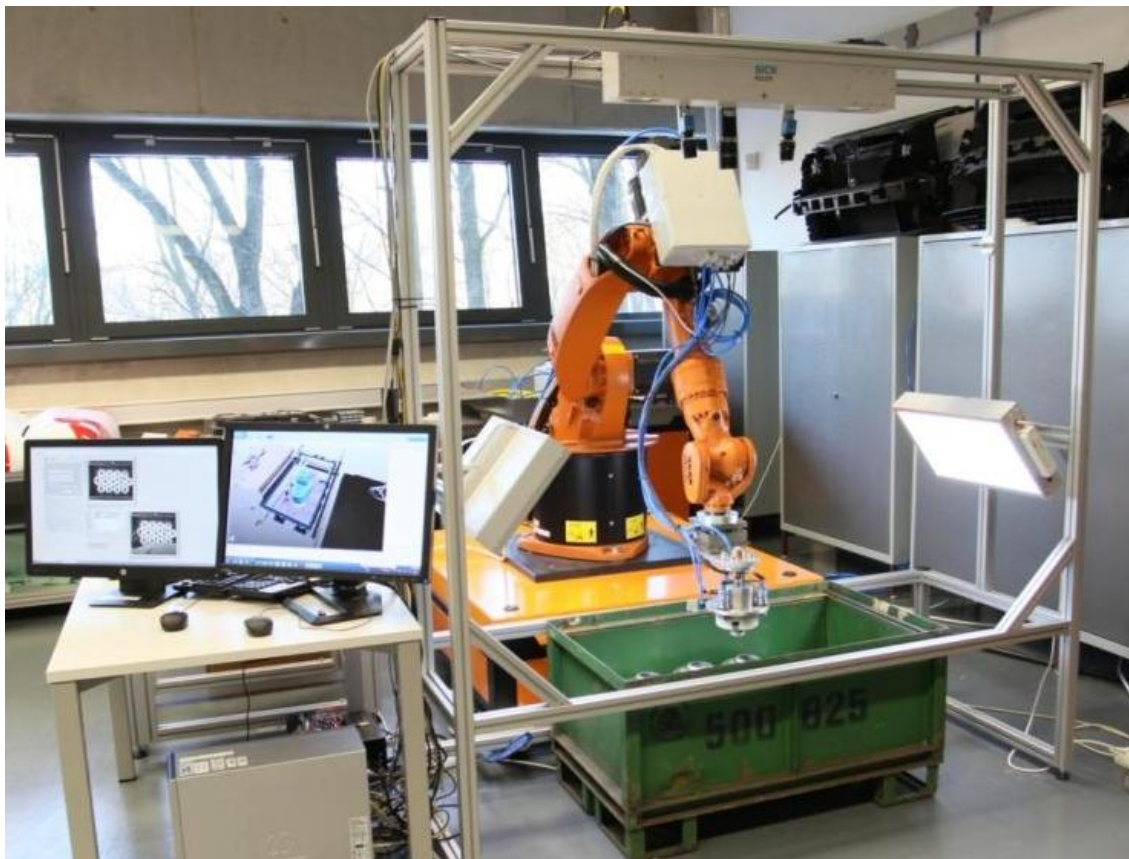
Jak je zřejmé, tak problematika bin picking nemůže být redukována jen na propojení kamerového systému s robotem. Velmi důležitý je také efektor, který musí umět redukovat odchylky od získaných souřadnic manipulovaného objektu. Schopnost redukovat tyto nepřesnosti má zpětně vliv na požadovanou přesnost získaných souřadnic a otočení objektu v prostoru a tedy má vliv i na cenu kamerového systému. Pochopení tohoto vztahu je klíčové pro úspěšný návrh spolehlivého, robustního a cenově optimalizovaného systému pro vybírání beden.

Pro aplikace bin picking jsou většinou používány angulární roboty. V případě aplikací vyžadujících spolupráci s člověkem jsou dnes voleny kooperující roboty, které jsou relativně bezpečné a nevyžadují uzavření robotu do zabezpečených prostor. Požadavky na robot pro bin picking jsou, vedle potřebného manipulačního prostoru a nosnosti (včetně hmotnosti efektoru), také vhodné komunikační rozhraní a řídicí systém umožňující komunikaci s dalšími zařízeními atd.

Pro testování aplikací bin picking bylo navrženo, zkonstruováno, vyrobeno a instalováno experimentální pracoviště (Obr. 6.57), které zahrnuje: průmyslový robot KR16 v kombinaci s řídicím systémem KRC4, sadu efektorů pro uchopování, systém průmyslových kamer (SICK RULER, BASLER, SICK PICOCAM), systém pro upevnění kamer, periferií pro odkládání, propojení komponent pracoviště, vyhodnocovací PC, elektroinstalace atd. Reálné pracoviště doplněné ještě o systém osvětlení je uvedeno na Obr. 6.58.

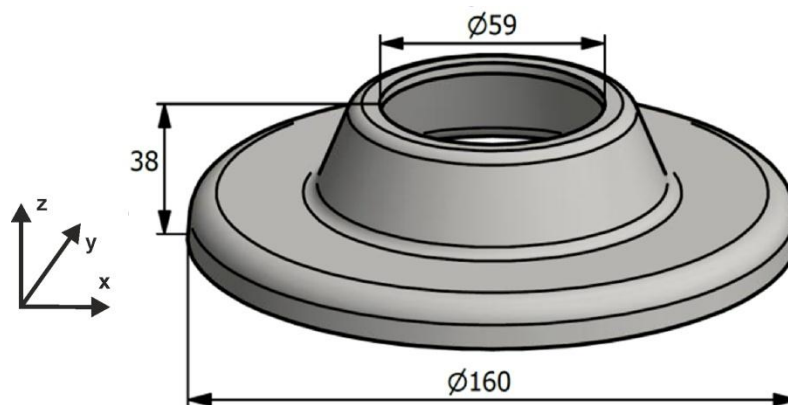


Obr. 6.57 Koncepte experimentálního pracoviště



Obr. 6.58 Pohled na reálné experimentální pracoviště s osazením systémem SICK PLB a alternativním řešením (kamery nad bednou a ultrazvukové odměřovače na chapadle)

Systém byl testován na objektu z průmyslové praxe, kterým byla tvářená „pružinová miska“ pro výrobu automobilů, Obr. 6.59. „Pružinová miska“ byla díky povrchové úpravě lesklá a její detekování bylo pomocí snímačů v optickém spektru ztížené. „Miska“ byla také částečně vyrovnána v bedně do sloupců, které se volně naklápěly do různých směrů (uspořádání se shoduje s narovnáním těchto objektů v praxi). Pracoviště bylo testováno s běžnou průmyslově používanou bednou (paletou, kontejnerem) 600 x 800 x 500 mm.

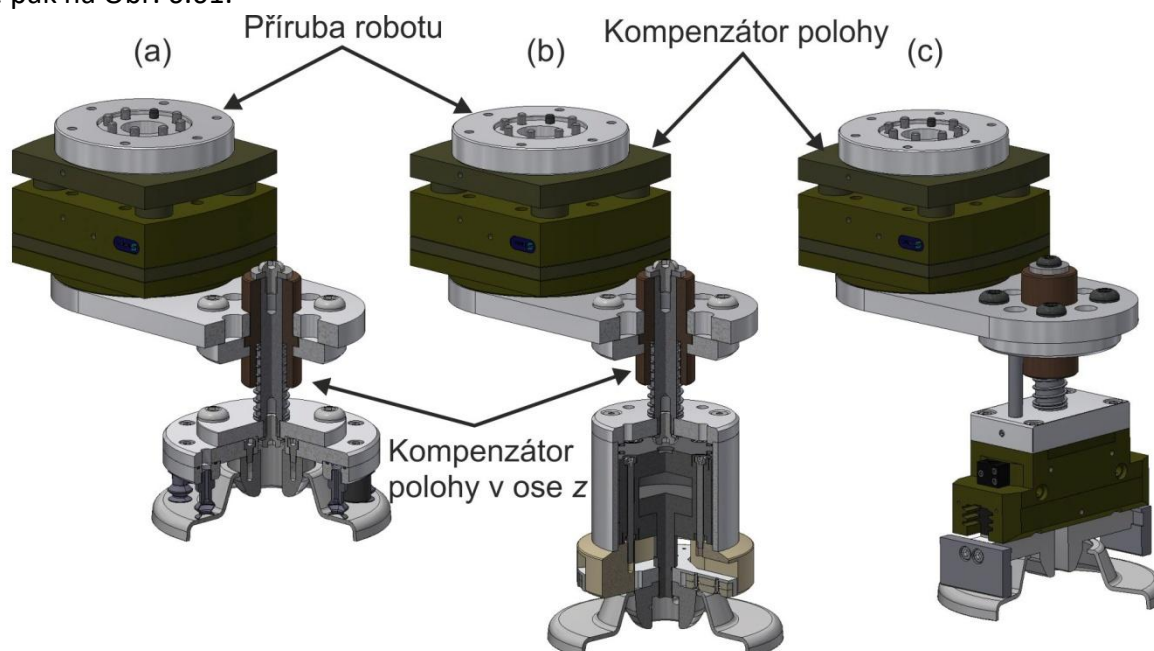


Obr. 6.59 Geometrie manipulovaného objektu: „pružinová miska“

6.7.1.1 Popis vývoje chapadla pro bin picking

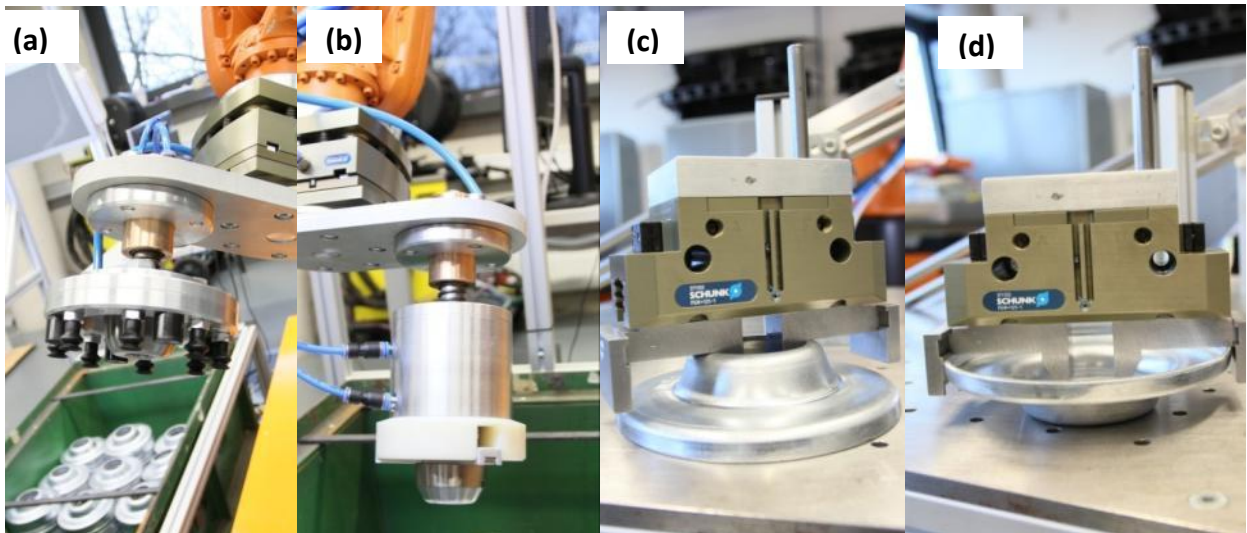
Na základě realizované rešeršní činnosti a zevrubné analýzy procesu byly pro systém uchopování předmětů navrženy tři alternativní hlavice. Hlavice byly navrženy pro daný objekt manipulace, tento přístup se jeví jako vhodnější, protože zařízení bude fungovat dlouhodobě, bez změny manipulovaného sortimentu. Podstatně dražší flexibilní řešení by nebylo využito a nezaplatilo by se. Cílem bylo vyvinout chapadlo, které umožní dostatečnou kompenzaci nepřesností v navádění robotu na daný objekt, podle dříve zmíněné filozofie.

V prvním případě se jedná o multi-přísavkovou hlavici, která uchopuje manipulovaný předmět v rovině velkého mezikruží, a to z obou stran misky, Obr. 6.60 (a). Druhá alternativa je tvořena magnetickou hlavici, která předmět uchopuje v rovině mezikruží horního výstupku, Obr. 6.60 (b). Třetí alternativa je mechanická hlavice, která uchopuje předmět za vnitřní průměr nebo za vnější průměr, když je miska otočena, Obr. 6.60 (c). Reálné provedení je pak na Obr. 6.61.



Obr. 6.60 Řez multi-přísavkovým (a) a magnetickým (b) chapadlem, model mechanického chapadla (c)

Ve všech případech jsou vlastní hlavice uloženy na odpruženém kompenzačním sloupku, který umožňuje zdvihem v rozsahu 25 mm kompenzovat nepřesné určení souřadnice v ose z (Obr. 6.61). Mezi přírubu robotu a hlavici je vložen kompenzátor polohy AGE-S-XYZ-100-0 od firmy Schunk, který umožňuje vyrovnaní ve vodorovné rovině (tj. směr x a y) v rozsahu ± 4 mm a ve vertikálním směru (tj. z) 10 mm. Tento prvek je využit pouze z bezpečnostních důvodů při testování celého systému. Vlastní navádění hlavice na předmět je realizováno prostřednictvím centrovacího trnu.



Obr. 6.61 Multi-přísavková (a), magnetická (b) a mechanická (c, d) úchopná hlavice

Konstrukční řešení multi-přísavkové hlavice (Obr. 6.60 a, Obr. 6.61 a) je tvořeno nosným prstencem s rozvodnými kanálky, které ústí do po obvodu rozmístěných 8 skládaných přísavek Schmalz s 1,5 záhybem, typ FSGA 16 NBR-55 G1/8-AG. Dosednutí předmětu je pak realizováno 4 plastovými dorazy, které zabraňují nežádoucímu zatížení přísavek při nepřesném určení souřadnice z.

Úchopný prvek magnetické hlavice (Obr. 6.60 b) je vytvořen 3 prvkovým ramenem, ve kterém jsou integrovány neodymové magnety. Vlastní řešení ramena je ve dvou provedeních, čímž je umožněna změna velikosti, resp. přitažné síly, magnetů. Je možné aplikovat 3 magnety o síle 75 N, případně zdvojit na sílu 150 N, což je aplikováno v řešení demonstrátoru. Při uchopení předmětu jsou magnety chráněny zasunutím 1,5 mm pod úroveň kontaktní plochy hlavice. Ke zrušení úchopné síly a pro uvolnění objektu se rameno s magnety zasune do hlavice za pomoci pneumatického válce FESTO ADN-50-15 se zdvihem 15 mm. Tříprvkové rameno hlavice je způsobilé i pro uchopení obrácené misky.

Mechanická úchopná hlavice je tvořena chapadlem firmy Schunk se dvěma úchopnými prvky (Obr. 6.60 c), které kombinují možnost vnitřního uchopení misky v normální poloze za otvor (Obr. 6.61 c) a vnější uchopení obrácené misky za okraj misky (Obr. 6.61 d).

V rámci experimentálního ověřování funkčnosti navržených chapadel byla zejména sledována schopnost chapadla vyrovnávat nepřesnosti určení polohy a orientace prostřednictvím připojeného kompenzačního zařízení.

Ukázalo se, že pro kompenzaci nepřesného stanovení orientace chapadla je výhodnější magnetická hlavice, která svým dosahem zvládne nepřesné uchopení přitažením objektu na vzdálenost 10 až 15 mm, kdy původně uchopení jedním magnetem se koriguje na dva a nakonec na tři magnety.

Naopak multi-přísavková hlavice je na uvedenou situaci poměrně citlivá, jelikož v případě nedosednutí všech přísavek nedojde k vytvoření podtlaku nezbytného pro

uchopení objektu.

Aplikace mechanického chapadla vykazuje také určitou robustnost, přičemž je zároveň způsobilá k uchopení obou orientací objektu.

V rámci dalšího ladění procesu byla konstrukce chapadel optimalizována tak, aby vzrostla robustnost chapadel a bylo dosaženo 100% uchopení. Přesto se z daných důvodů jeví magnetická hlavice jako výhodnější, zejména s ohledem na snadnou ochranu poškoditelných dílů a také lepší kompenzační účinek úchopných prvků způsobený dálkovým působením magnetů na nepřesně polohovaný objekt a funkční pasivní středění objektu a chapadla.

6.7.1.2 Snímače pro bin picking

V rámci výzkumu proběhla nejprve rešerše současného stavu techniky získání vhodných dat pro detekci technologické scény s identifikací objektů pro následný odběr nejvhodnějšího objektu robotem. Pro potřeby správné identifikace objektu pro jeho odebrání je potřeba získat jeho souřadnice v prostoru. Převážná většina systémů pro detekci objektů v bedně pro následné odebrání využívá 3D kamer, které pracují na různých principech. Je tak získáván 3D model snímané technologické scény. Nejčastěji je využíváno VIS a NIR.

Obecně musí snímače umožnit získání informace o poloze následně uchopeného objektu, a to v osách x , y , z , ale i otočení kolem těchto os. Celkem je třeba získat až 6 údajů o poloze. U sledované misky díky osově souměrnosti postačuje údajů jen 5 (poloha v osách x , y , z a natočení kolem osy x , y). Případná nepřesnost identifikace polohy pak musí být kompenzována daným efektem.

Pravděpodobně nejčastější zařízení využívá principu 2D triangulace (kap. 4.4.1.2), dále je často využíván princip 3D triangulace, nejčastěji techniky světelného vzoru (kap. 4.4.1.3) v kombinaci se stereo viděním (kap. 4.4.2.3), kterou lze teoreticky použít i samostatně. Dále fotometrické stereo (kap. 4.4.6) a teoreticky snímačů ToF (kap. 4.4.10). Využít lze také dalších snímačů především společně na principu senzorové fúze (multi-senzoriky, kap. 6.7.1.4), kde jsou v uvedeném výzkumu uvažovány snímače založené na snímání vzdálenosti pomocí ultrazvuku, kap. 3.4.

Z rešerše současného stavu je patrné, že vývoj automatizace vybírání beden dospěl do stadia, které startuje širší (nikoliv masové) rozšíření v praxi. Zásadní překážkou širokého nasazení je cena řešení, kdy vysoká investice spolu s dalšími náklady je prakticky nenávratná v rámci úspory mzdových a dalších nákladů (v podmínkách ČR a současných mzdách). Dalším problémem je především chybějící aplikační know-how a reálné omezení dodavatelských řešení, která jsou mylně prezentována jako univerzální a flexibilní řešení a zároveň označována jako jednoduché řešení pro bezprostřední rychlé nasazení.

Identifikace objektů je zvládnutá pro mnoho typových představitelů, ale systémy mají své limity. Především se jedná o velikost objektu, kdy pro standardní palety (bedny) větších rozměrů je obtížné spolehlivě identifikovat menší objekty, například pro používanou paletu

1 200 x 800 x 500 mm se snižuje spolehlivost identifikace objektů pod 80 mm. Jedná se o problém rozlišení, kdy s menší bednou je možné identifikovat objekty také menších rozměrů.

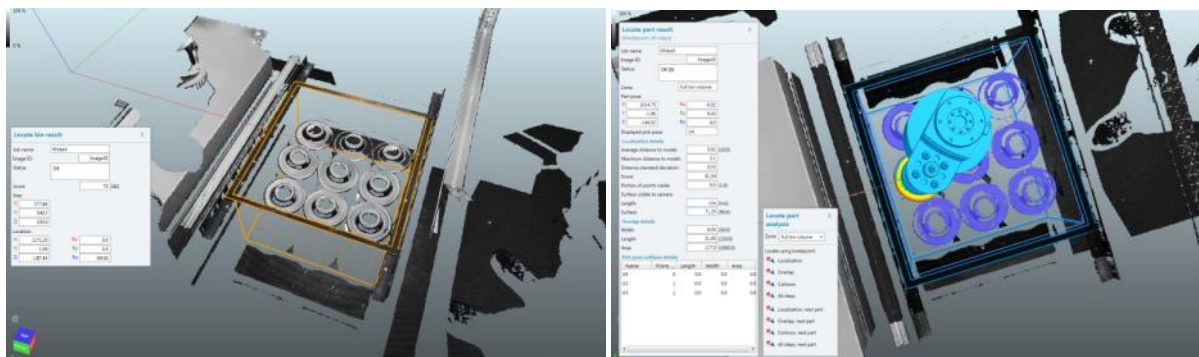
6.7.1.3 Testované dodavatelské řešení detekce objektů

Na uvedeném pracovišti jsou testována dodavatelská řešení, jako je např. SICK RULER s 3D systémem SICK PLB-500 [165]. Jedná se o řešení, která jsou flexibilní, snadno programovatelná nebo parametrizovatelná a nevyžadují hluboké znalosti o způsobu získání informací o uchopovaném objektu. Takováto řešení nabízí několik firem a jsou jednoznačně flexibilnější, ale také nákladnější.

Testované řešení se SICK RULER a se softwarovým balíčkem pro lokalizaci dílů PLB studio 4.0.0.276 se ukázalo jako velmi pružné a připravené k průmyslovému nasazení. Toto zařízení pracuje na principu 2D triangulace (kap. 4.4.1.2), snímač (kamera) je v pevné poloze a pohyb linie paprsku je zajištěn rozkmitáním paprsku pomocí zrcátka. To znamená, že na každé místo v obrazu dopadá pod jiným úhlem. Tím je do jisté míry eliminován problém vlastních reflexí.

U tohoto řešení jsou spolehlivě řešeny kolizní stavy, systém dokáže spolehlivě najít objekt pro uchopení. Implementací 3D kamery SICK RULER a software PLB studio (Obr. 6.62) se podařilo na demonstrátoru dosáhnout takřka 100% spolehlivosti odebrání objektů ze sloupců, a to i v případech uměle navozené extrémní změny orientace objektu. Příprava zařízení pro detekci jedné třídy objektů je otázkou několika hodin. Komplikovanější je pak nalezení optimálních parametrů při světelném rušení, změně vnějšího osvětlení (např. během dne), zvýšení robustnosti při mírné změně povrchové úpravy a další. Obtížnější je také zajištění komunikace s robotem a s externími systémy. To vše je již časově náročnější a vyžaduje zapojení odborného týmu na několik dní až týdnů. Projevuje se tak klíčový problém stability zařízení při změnách vnějších parametrů a při vzájemné komunikaci jednotlivých systémů celého zařízení.

Lokalizace objektu ideálních vlastností (barvy a tvaru) je dosažitelná s vysokou přesností, kdy chyba určení polohy nepřesahuje $\pm 0,5$ mm. Chyba určení reálného objektu (misky) s vysokým podílem parazitních reflexí může být až o řád horší.



Obr. 6.62 Softwarové prostředí PLB Studio 4.0: získaný 3D obraz (mračno bodů v prostoru), vyhodnocená odebrací pozice uvnitř omezené přepravky

6.7.1.4 Vyvíjené alternativní řešení detekce objektů

Na pracovišti jsou také testována alternativní řešení pro získání informací o objektu manipulace, která jsou připravena pro danou třídu uchopovaných objektů. Alternativním řešením jsou myšleny systémy, které nejsou dodávány vcelku a je nutné je konstruovat a následně programovat. Tato řešení jsou hardwarově levnější, ale méně flexibilní a vyžadují vývoj potřebného software. Tento směr je pro praxi také zajímavý, protože většina aplikací je pouze na jednu třídu problémů nebo dokonce jen na jediný výrobek během životnosti zařízení. Finanční úspory při opakovaném nasazení pro danou třídu problému jsou pak velmi zajímavé.

V úvodní fázi řešení bylo zvažováno několik metod získání 3D souřadnic pro uchopení objektu robotem. Získání 3D obrazu ve své podstatě není jednoduché a ve spojení s lesklým povrchem dílů se dále výrazně komplikuje. Nejprve je proveden rozbor odmítnutých variant a poté jsou v návazných podkapitolách ukázána řešení, která byla použita pro testy na demonstračním pracovišti.

VARIANTA A: 3D obraz z promítání laserového paprsku (kap. 4.4.1.2)

Toto řešení je velmi dobře rozpracováno mnoha firmami (kap. 6.7.1.2), [165, 166]. Přístup umožňuje detekovat širokou škálu objektů a dá se považovat za relativně flexibilní řešení. Nicméně i tento princip má horší výsledky při získání 3D scény s výrobky s lesklým povrchem. Dále cena samotné 3D kamery je vysoká, a to již bez potřebného dalšího hardware (laser, zařízení pro pohyb laseru, enkodér atd.) a pokročilého software. Pro řešení lze použít i běžné 2D kamery bez hardwarového uzpůsobení pro 3D skenování, což snižuje spolehlivost detekce. Samotný software by byl velmi komplikovaný a jeho vývoj zdlouhavý. Celkově nelze očekávat v této oblasti úspory řešení pro bin picking.

VARIANTA B: Získání tvaru z deformace promítaného obrazu (kap. 4.4.1.3)

Tato varianta představuje řešení, které je opět velmi dobře rozpracováno a využíváno mnoha firmami, např. [167]. Jedná se především o použití pro menší rozměry objektů. Detekce celé bedny by vyžadovala velký projektor s proměnným rastrem, což je velmi nákladné. Další náročnou položkou je software. Celkově nelze očekávat v této oblasti úspory řešení pro bin picking.

VARIANTA C: 3D obraz získaný zToF senzoru (kap.4.4.10)

Senzory Time of Flight (ToF) se jeví jako použitelné pro levnější řešení. Bylo testováno zařízení REVscan řady HandyScan, které poskytuje informace o poloze v ose x , y , z pro každý bod, ukázka výsledku je na Obr. 6.63. Toto zařízení by mohlo být pro účely bin picking použitelné, ale je nákladné (800 000 Kč za samotný senzor HandyScan se zobrazovacím software). Existují průmyslová řešení, která jsou v ceně pod 70 000 Kč, ovšem maximální dosažitelná přesnost není pro reálné nasazení dostatečná. Přesnost v ose z je u kamery BASLER [168] na úrovni ± 10 mm a pod 10 mm u kamery StarForm [169], což je na hranici použitelnosti. Také rozlišení samotné kamery ve 2D pro nalezení přesnějších souřadnic v ose x a y je vcelku nízké (0,3 Mpx, respektive 1,3 Mpx), což by vyžadovalo použít několik těchto kamer, případně levnějším řešením by byla integrace běžné 2D kamery

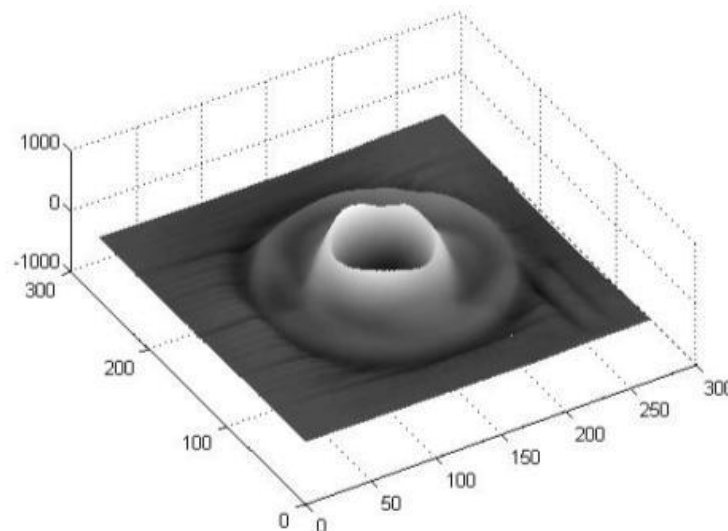
s rozlišením okolo 5 Mpx. Perspektivně, po zvětšení celkového rozlišení těchto kamer ve všech osách, je řešení reálné a cenově zajímavé.



Obr. 6.63 Získaný 3D obraz z ToF senzoru REVscan

VARIANTA D: 3D model získaný pomocí fotometrického sterea (kap. 4.4.6)

Fotometrické stereo se jeví jako velmi zajímavé a levné řešení, kdy by postačovala jedna kamera a několik osvětlovačů (3 a více). Tyto systémy pro další použití existují, např. [87]. Tento přístup byl proto laboratorně testován (nejlepší výsledek je uveden na Obr. 6.64 – bez kalibrace), ale vyžadoval by úplné odstínění technologické scény. Dále snímání lesklých povrchů je velmi komplikované a shoda s CAD modelem je nízká.



Obr. 6.64 Výsledek získání 3D modelu dílu „miska“ pomocí fotometrického sterea bez kalibrace

Jako vhodné pro detekci daného objektu se ukázaly dvě varianty: VARIANTA E, která využila multi-senzorové řešení pro implementaci do demonstračního pracoviště, a testována byla VARIANTA F, ukazující možnost získání 3D modelu pomocí stereo vidění.

6.7.1.5 Multi-senzorové řešení

Multi-senzorové řešení (VARIANTA E) je založeno na propojení senzorů různých typů. Předpokladem je, že jsou použity běžné, relativně levné senzory. Samostatně tyto senzory poskytují nedostatečné množství dat pro aplikaci bin picking, ale vhodně společně opatřená data umožní získat potřebné informace pro identifikaci a následné uchopení objektu. Tento přístup vede k levnějším řešením, ale často při omezení na aplikaci v dané třídě problému. Navržené řešení je tak vhodné pro uvedený díl a jemu příbuzné objekty.

Jak již bylo uvedeno, vzhledem k osově souměrnosti „misky“ je třeba získat pomoci senzorů pozici středu „misky“ v ose x , y a z a její natočení kolem osy x a y , tedy pět parametrů. Navržené multi-senzorové řešení je naprogramováno v programu LabView a je založeno na kombinaci senzorů:

- průmyslová barevná 2D kamera BASLER s rozlišením 5 Mpx (Obr. 6.66 a) umístěná nad středem bedny,
- tři ultrazvukové senzory SICK po obvodě hlavice (Obr. 6.66 b) umístěné po obvodu pod úhlem 120° , takto umístěné senzory jsou minimem pro získání natočení kolem osy x a y .

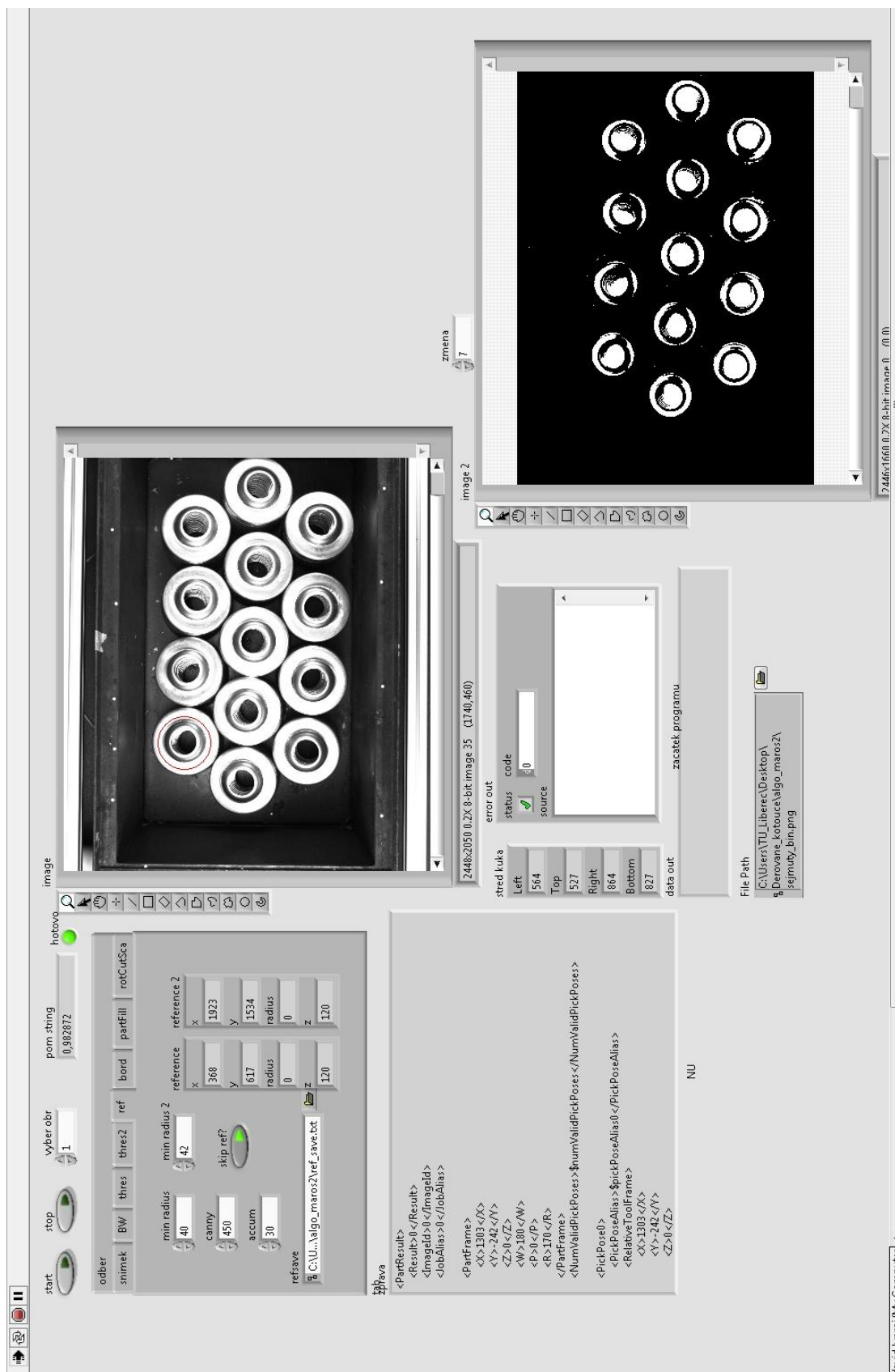
Náhled na vyvinutý software v prostředí LabView je uveden na Obr. 6.65. Průmyslová kamera poskytuje snímek celé bedny s objekty manipulace, následné zpracování obrazu pomocí software nalezne jednotlivé „misky“ a jsou nalezeny souřadnice jejich středu v ose x a y . Pomocí software je vybrán vhodný objekt pro odebrání, kdy přidruženým kritériem je rovnoměrné odebírání „misk“ z bedny. Software umožňuje zapamatování pozice, kde byl objekt odebírán a přednostně navádí robot na pozici bez odebrání objektu.

Software pošle souřadnice vybraného objektu do robotu a nad vybraný střed objektu je navedena úchopná hlavice, začnou se načítat data z ultrazvukových senzorů do software a provede se výpočet pozice objektu v ose z a natočení objektu kolem osy x a y , Obr. 6.67. Následně jsou parametry poslány na robot a je provedeno naklopení hlavice, hlavice sjede do požadované polohy v ose z a dojde k odebrání dílu. PC pro zpracování obrazu a dat z ultrazvuku s uvedeným software je podřízené řídicímu systému robotu. Robot si vyžádá postupně potřebné parametry od PC. Komunikace je podobná jako se systémem PLB a software robotu byl pro toto řešení jen modifikován.

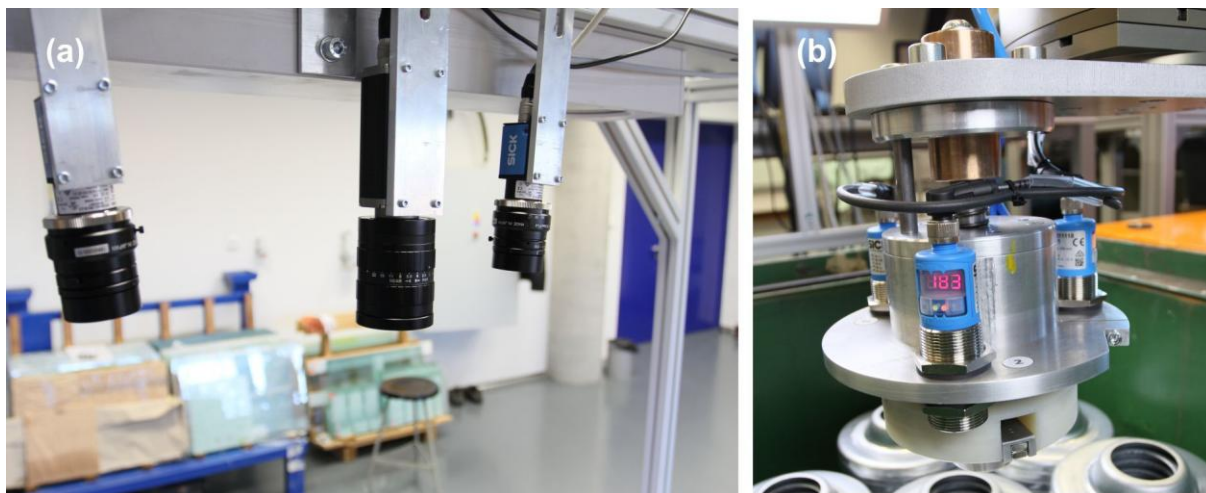
Řešení musí být také vybaveno vhodným typem efektoru pro odejmutí dílu, který musí umožňovat kompenzaci případných nepřesností z měření a následně tak uchopit objekt správně.

Významným problémem, který je nutno řešit, je způsobilost senzorů rozpoznat vyšší náklon „misky“ než 15° . To není dosud možné ze dvou důvodů. Vyšší úhly již znemožňují detekování odraženého signálu, anebo signál již směřuje mimo povrch líce „misky“. Řešením je upravená zástavba ultrazvukových snímačů do úchopné hlavice tak, aby byly umístěny na menším roztečném poloměru a vývoj subrutiny pro naklopení chapadla po detekci objektu. V případě že jsou zaznamenána pouze data z jednoho senzoru, dojde k vhodnému naklopení greiferu a novému detekování objektu. K úhlu, o který se chapadlo otočí, je přičten nově

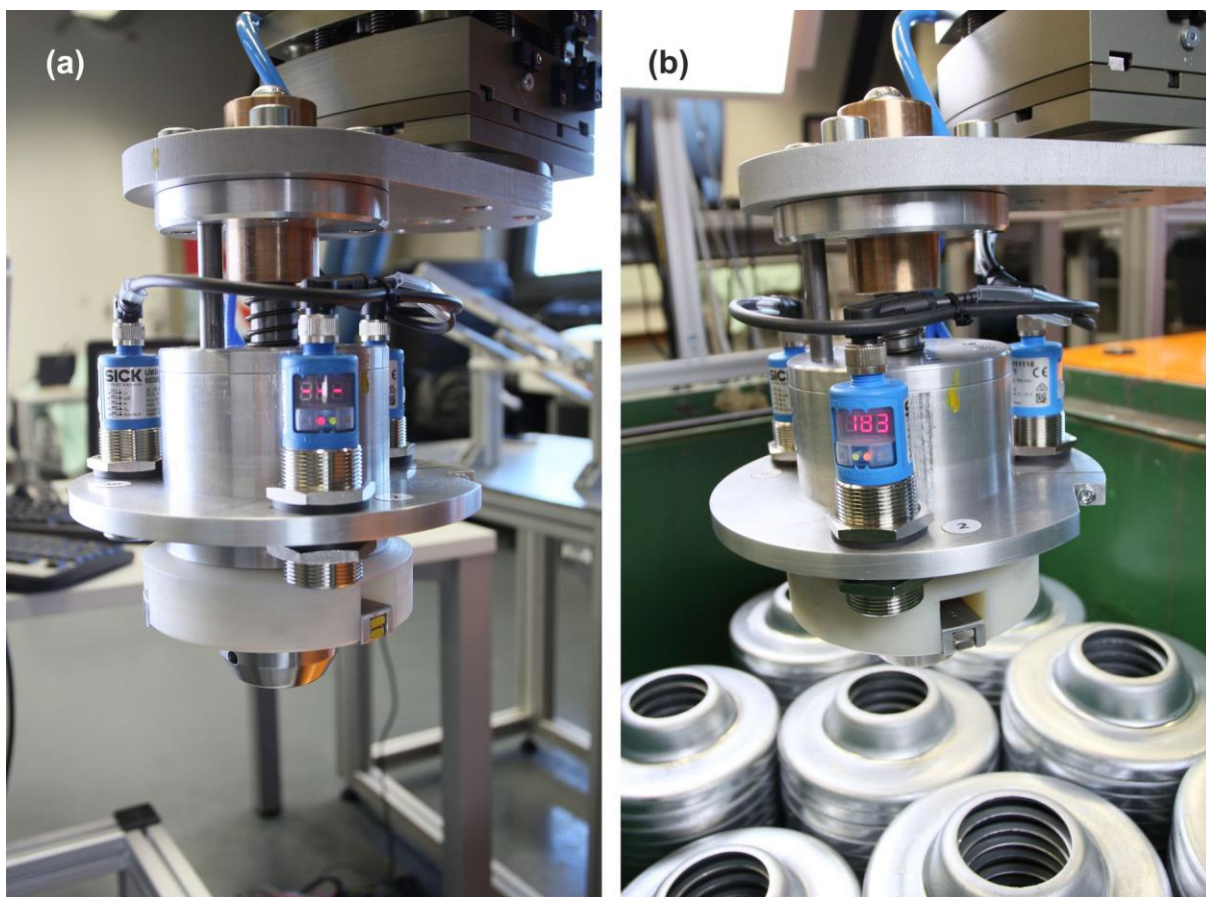
detekovaný úhel naklonění ze senzorů a dojde k naklonění chapadla do požadované pozice pro odebrání.



Obr. 6.65 Náhled vyvinutého software pro stanovení vhodného objektu pro odebrání a získání souřadnic x , y , z a natočení objektu kolem osy x a y



Obr. 6.66 Alternativní řešení: (a) systém kamer (prostřední kamera je používána pro multi-senzorové řešení, krajní kamery jsou použity pro stereo vidění), (b) osazení magnetické hlavy ultrazvukovými senzory



Obr. 6.67 Robot v pozici (a) před navedením nad objekt pro odebrání a (b) robot v pozici měření nad objektem pro odebrání, na displeji senzoru jsou vidět vyčítané hodnoty

Lze konstatovat, že navržené alternativní řešení je vhodné pro uvedenou úlohu a je upravitelné na danou třídu problémů. Systém není flexibilní a je vhodný pro objekty podobného tvaru a hlavně s minimem změn v průběhu jeho životnosti, řešení nemůže dosahovat flexibility PLB studia firmy SICK. Testy prokázaly, že toto řešení má potenciál k následnému vývoji do stavu spolehlivého fungování (po dovyvinutí software a řešení kolizních stavů s okolím, snížení citlivosti na světelné podmínky).

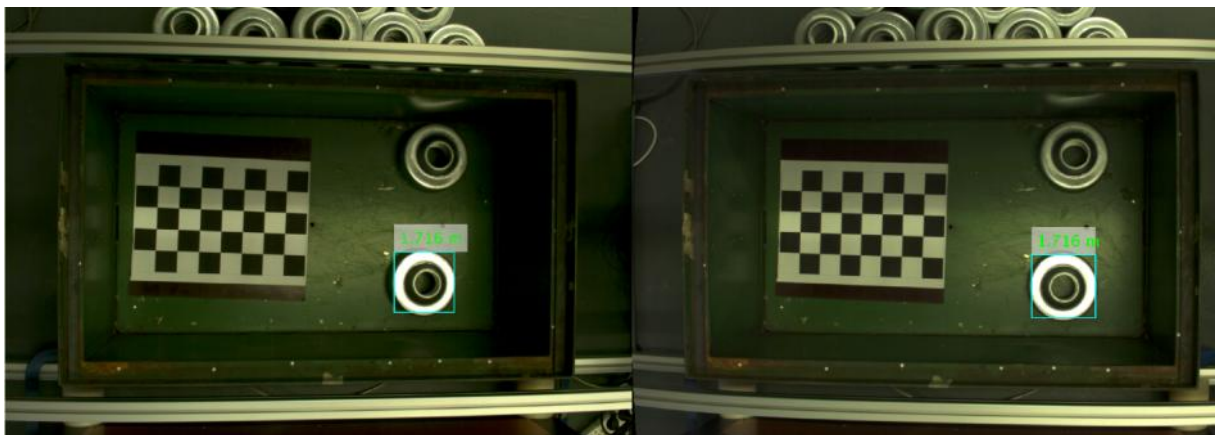
6.7.1.6 Detekce objektu pomocí stereo vidění

Využití stereo vidění (VARIANTA F) se ukazuje jako vhodné pro alternativní řešení (kap. 4.4.2.3). Pomocí dvou kamer lze detekovat pozici objektu v ose x , y a z . Umístění kamer je patrné z Obr. 6.66 (a). Pohled z obou kamer se stanovením vzdálenosti je na Obr. 6.68.

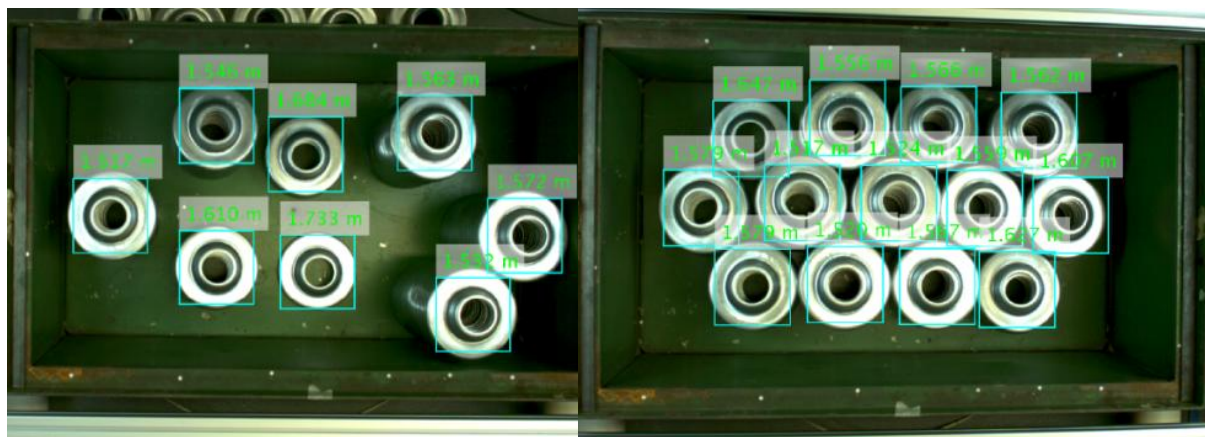
Pro nastavení kamer je důležitá kalibrace, která je provedena formou šachovnice se známým rozměrem. Pro kalibraci je třeba získat optimálně 15 snímků s různou polohou šachovnice a naklopení. Výsledky testů jsou uvedeny na Obr. 6.69.

Toto alternativní řešení vykazuje dostatečnou přesnost v ose x a y , ale v ose z je dosažitelná přesnost na úrovni ± 10 mm s předpokladem, že bude možné tuto přesnost výrazně zlepšit až na ideální úroveň ± 5 mm. Základní nevýhodou přístupu je problém s naklopením, kdy nepřesnost v ose z má zásadní vliv na nepřesnost stanovení natočení v ose x a y .

Jako vhodné řešení lze uvažovat propojení obou alternativních řešení, tj. stereo vidění s použitím ultrazvuku. Systém se tak stane stabilnějším, přesnějším a odolnějším vůči nepředpokládaným stavům.



Obr. 6.68 Obrázek z levé a pravé kamery, na obrázku je vidět šachovnice pro kalibraci a definovaný objekt se změřenou vzdáleností od kamery v metrech



Obr. 6.69 Výsledky testů se stereo vidění

6.7.1.7 Závěr kapitoly

Automatické vybírání beden (bin picking) má velký potenciál, ale v současné době neexistuje levné a dostupné řešení s vysokou mírou flexibility. V tomto případě se projevuje klíčový problém stability zařízení při změnách vnějších parametrů a při vzájemné komunikaci jednotlivých systémů celého zařízení (snímače – řídicí jednotka – robot). Bylo testováno průmyslové dodavatelské řešení a také alternativní. Dodavatelská řešení se ukazují jako schůdná, ale díky své ceně často nevedou k potřebným úsporám při nasazení v reálném provozu. Alternativní řešení jsou levnější, ale při ztrátě flexibility a spolehlivosti.

Opět je možné na tomto příkladu prezentovat důležitost vhodných konstrukčních řešení, která snižují nároky na obrazovou analýzu. Jedná se především o konstrukci chapadel, která mohou snížit nároky na přesnost lokalizace.

7 Závěr

Habilitační práce v úvodu představila přehled základních možností získání obrazových dat pomocí různých principů založených na detekci vhodných fyzikálních polí (kap. 3). Takto ucelený přehled metod, které využívají různých energií, nebyl nikde jinde autorem nalezen. Přehled bude využit jak ve výuce odborných předmětů (především formou skript), ale také jako podklad (příručka) při úvodním rozhodování v průmyslové praxi, jakým způsobem detekci objektů řešit a jaké základní možnosti lze pro získání obrazových dat využít.

Další teoretická část byla věnována interpretaci obrazových dat se zaměřením na fraktální geometrii a získání 3D modelu sledovaného objektu (kap. 4). Podobně ucelené texty v cizí literatuře existují, takže budoucí uplatnění je především ve výuce odborných předmětů v češtině.

V úvodu této práce byly specifikovány cíle:

- 1) Vývoj metodiky získání a interpretace dat ze strukturovaných povrchů, která zajistí, aby data a následné informace byly objektivní a zároveň spolehlivé a kompletní.
- 2) Specifikovat vhodné fyzikální principy získání obrazových dat objektů z transparentních materiálů a materiálů s lesklým povrchem.
- 3) Teoreticky řešenou problematiku přivést do použitelného stavu v praxi, včetně konstrukčního řešení.

Výsledky vědeckovýzkumné činnosti s důrazem na praktické využití jsou prezentovány v kap. 5 a kap. 6.

S naplněním prvního cíle souvisí výsledky **aplikace fraktální geometrie na průmyslová data**. Podařilo se rozvíjet ideu disertační práce autora, která se týkala použití fraktální geometrie v průmyslové praxi. Pro potřeby popisu korozního napadení různých typů kovových materiálů sklovinou nebo atmosférou byla vyvinuta a uvedena do praxe metodika hodnocení strukturovanosti rozhraní skloviny a kovu (kap. 5.1). Důležitým návazným krokem ve vztahu k disertační práci autora je také upřesnění metodiky a výběr vhodných nástrojů pro detekci. Metodika byla postupně vylepšena, stala se standardní součástí analýzy na pracovišti TUL a byla prezentována v odborných publikacích (dvě uvedeny v příloze práce [P4, P5]). Byly zde také porovnány dvě metodiky odhadu fraktální geometrie pro stejný povrch: popis křivky rozhraní metalografického výbrusu a 2D snímků této struktury. Bylo prokázáno, že vyšší stabilita ve výsledcích při změně jasu je jednoznačně u popisu křivky rozhraní.

Analýza křivek rozhraní světla a stínu byla využita při objektivizaci off-line testu zvlnění plochého skla (kap. 5.2). Tento princip a použití nástrojů fraktální geometrie byl již prezentován v rámci disertační práce autora a také v odborných publikacích (jedna uvedena

v příloze [P1]). V rámci habilitační práce byla řešena problematika nalezení koeficientů pro přepočet několika hodnot z analýzy na jedno směrodatné číslo pro hodnocení jakosti. Jakost byla následně specifikovaná ve stejné škále tříd jakosti jako při subjektivním hodnocení v běžné praxi. Dále bylo přistoupeno k návrhu **umístění zařízení přímo na linku (on-line in-line)**. Bylo navrženo a zkonstruováno experimentální zařízení a připraven software, který po dobu několika měsíců snímal a hodnotil polovinu pásu vyráběného plochého skla. Výsledky prokázaly spolehlivost, shodu se subjektivním hodnocením a především použitelnost v praxi s možností velmi rychle detekovat změny v jakosti vyráběného skla. Navržen byl následně prototyp zařízení. Jedná se o případ, kdy základní výzkum vedl přes aplikační výzkum a vývoj až po realizaci zařízení pro praktické uplatnění v průmyslu. Zároveň je dobrým příkladem nalezení vhodného konstrukčního upořádání na základě specifikovaných podmínek získání a následné interpretace dat. Pro off-line a on-line hodnocení byl vyvinut autorem práce software v prostředí Matlab. Jedná se tedy o naplňování cíle 3.

Přestože hodnocení povrchové struktury pomocí 2D snímků není při změnách stabilní, lze ho použít pro porovnání vzorků v rámci jednoho nastavení pracoviště. **Hodnocení povrchové struktury** je možné provádět opět pomocí souboru nástrojů, které využívají jak statistiky, odhadu fraktální dimenze, Fourierovy transformace a dalších (kap. 5.3). Podařilo se objektivizovat hodnocení povrchových 2D struktur a nalézt nástroje pro automatické vyhodnocení charakteru povrchových struktur, které mohou být prakticky použity (naplňování cíle 1).

K této vědeckovýzkumné části se především vztahují odborné příspěvky, z nichž část je uvedena v příloze práce. Souhrnně jsou základní možnosti fraktální geometrie uvedeny v článku, který je přílohou této práce [P2].

Další část práce byla zaměřena na naplňování cíle 2, tedy možnosti **získání obrazových dat z transparentních objektů a objektů s lesklým povrchem**. Potenciální principy získání obrazových dat byly specifikovány pro objekty ze skla (předpokládá se přenositelnost na další transparentní materiály), které využívají detekce různých fyzikálních polí (kap. 6.1). Možnosti detekce vad uvnitř výrobku pak byly rozvíjeny na reálné problematice detekce vad v mačkárenských tyčích (kap. 6.2). Byly navrženy vhodné postupy pro praktické využití kontroly při jejich výrobě. Vady, jako jsou kaménky a bublinky, je možné detekovat pomocí pohyblivého liniového laseru, který provádí „světelný řez“ tyčí. Pokud narazí na vadu, ta je vlivem odrazu na povrchu vady „rozsvícena“. Podobně funguje prosvětlování tyčí, které umožňuje i snadnější detekci povrchových vad. Detekce šlír je podstatně složitější, pro svoji relativní jednoduchost lze doporučit metodu stínů a také metodu deformace obrazu geometrického vzoru, který tyčí projde. Prokázalo se, že uvedené metody jsou spolehlivé a umožňují případnou kvantifikaci míry zastoupení vad a minimálně u kamének a bublinek také jejich vzájemné rozlišení. Tyto výsledky jsou obecně přenositelné na uvedené vady v dalších výrobcích ze skla.

V rámci naplňování cíle 2 byly vedle detekce vnitřních vad navrženy možnosti detekce tvaru transparentních objektů, ukázána pak byla možnost detekce rozžhavené skloviny při jejím dávkování (kap. 6.3). Ukázána byla i technicky proveditelná detekce napětí ve výrobku ze skla (kap. 6.4).

Vědecký základ má **využití bodových konfokálních snímačů pro získání 3D modelu** objektu ze skla (cíl 2, kap. 6.5). V práci jsou prezentovány základní testy ověření parametrů v běžných podmínkách. Použití konfokálních snímačů je limitováno především relativně malým rozsahem měření a malými odklony normály měřeného povrchu od osy snímače. Uvedeny jsou také výsledky použití robotu pro navádění snímače na body měření. Jak se ukázalo, přesnost měření je dána přesností polohování robotu. Bylo také prokázáno, že opakovatelná přesnost najetí do stejného bodu robotem je zhruba o řád vyšší než absolutní přesnost. Tato kapitola je koncipována tak, aby zveřejněním této práce nedošlo k porušení obchodního tajemství nebo smluvních závazků. Tedy nemohly být uvedeny všechny konkrétní aplikační výstupy realizované pro průmyslové partnery.

Možnosti aplikace konfokálních snímačů pro měření skla byly prezentovány také na detekci počátku deformace plochého skla na výrobní lince (detekce bortů, cíl 2, kap. 6.6). Tato metodika byla dále srovnána s možnostmi detekce bortů pomocí projekce odraženého liniového laserového paprsku od povrchu plochého skla. Tato detekce se ukázala jako spolehlivá a přesná, umožňuje nasazení na výrobní linku. Měření bylo také porovnáno s běžným testem, který využívá odrazu strukturovaného světla (zebra-desky s pruhy pod úhlem 45°). Obě alternativně navrhovaná měření (pomocí konfokálního snímače a odrazu laserové linie) umožňují vyšší přesnost a jsou snadněji přenositelná na výrobní linku. Tato část práce také potvrdila možnosti využití přístupu ke sklu, jako k materiálu s lesklým povrchem. Oproti „běžnému“ lesklému povrchu je nutné použít relativně velkých úhlů dopadu paprsků na povrch od normály.

Poslední část se zabývá detekcí lesklých objektů pro **bin picking** (cíl 2, kap. 6.7.1). Bylo testováno průmyslové dodavatelské řešení a také alternativní. Dodavatelské řešení firmy SICK bylo možné nastavit tak, aby přesnost byla dostatečná pro uchopení objektů, nepřesnosti pak byly kompenzovány použitím vyvinutých chapadel. Dodavatelská řešení se ukazují jako schůdná, ale díky své ceně často nevedou k potřebným úsporám. Alternativní řešení je založeno na senzorové fúzi. Využita byla průmyslová kamera s plošným senzorem a tři bodové ultrazvukové snímače vzdálenosti. Řešení se ukázalo jako použitelné pro daný typ manipulovaného objektu s doporučením použít dvě kamery uspořádané do testovaného stereo vidění. Opět nepřesnosti v řádech milimetrů byly následně kompenzovány vyvinutými chapadly. Alternativní řešení jsou levnější, ale při ztrátě flexibility a spolehlivosti. Prokázalo se, že návrh řešení snímání objektů je úzce spjat se schopností chapadel kompenzovat případné nepřesnosti v navádění na objekt. Tedy konstrukce chapadel následně ovlivňuje spolehlivost zařízení a komplikovanost softwarového řešení. Výsledky naplňují také cíl 3.

Celá habilitační práce je navíc koncipována tak, aby mohly být ucelené části použity pro pedagogickou činnost, což je důležitým aspektem akademické práce na univerzitě. **Práce je také připravena tak, aby mohla být publikována formou odborné monografie.**

V rámci výzkumu a vývoje byly také dlouhodobě budovány laboratoře, kde byla realizována převážná většina zde uvedených výsledků. Tyto laboratoře jsou používány pro výuku a jsou k dispozici pro studenty k realizaci jejich závěrečných prací. V rámci zde uvedeného výzkumu vzniklo několik bakalářských a diplomových prací včetně dvou disertačních prací [1, 5].

7.1 Přínosy pro vědu

V dostupné literatuře nebyl dosud publikován popis konkrétních dat z průmyslové praxe pomocí kombinace fraktální geometrie, statistiky a dalších nástrojů v tomto rozsahu. Využití synergického efektu několika parametrů, které provádějí objektivní ohodnocení struktury povrchu, má své praktické výsledky. Výběr jen tří parametrů z celé škály získaných parametrů vede k pružnému využití metodiky na různé typy dat. Následná možnost přepočtu těchto parametrů na používanou třídu jakosti (jedno číslo) je pro využití v praxi velmi významným přínosem.

Vědecké přínosy práce a rovněž celého dosavadního výzkumu lze spatřovat především v úrovni uplatnění vědeckých poznatků na konkrétní aplikace v průmyslu. Jedná se především o aplikovaný výzkum, který zde tvoří spojnici mezi vědou, experimentem a průmyslovým nasazením. Vědecké přínosy práce lze heslovitě shrnout do těchto bodů:

- V oblasti aplikace fraktální geometrie:
 - aplikace nových matematických postupů pro data z průmyslové praxe,
 - specifikace výběru tří parametrů hodnocení složitosti povrchu pomocí korelace,
 - specifikace vlivu změny jasů na výsledky při použití mřížkové a obvodové dimenze.
- V oblasti detekce vad objektů z transparentních materiálů:
 - návrh možností využití různých fyzikálních polí pro detekci tvaru objektu a jeho vnitřních vad.
- V oblasti popisu tvaru pomocí projekce odraženého laserového paprsku:
 - úvodní vývoj metodiky pro popis tvaru transparentních a lesklých materiálů.

7.2 Přínosy pro průmyslovou praxi

Vzhledem k tomu, že práce je zaměřena na praktické aplikace, jsou její přínosy pro tuto oblast zřetelnější. Výzkum především prokázal, že metody užívané ve vědě a výzkumu jsou přenosné do průmyslové praxe. Dalším závěrem také je, že znalosti možností a principů strojového vidění ovlivňují celou koncepci a následně konstrukci zařízení.

Přínosy pro praxi lze shrnout do těchto bodů:

- V oblasti aplikace fraktální geometrie pro hodnocení korozního napadení kovů a slitin:
 - vylepšení metodiky popisu korozního napadení kovů sklovinou a atmosférou,
 - dlouhodobé využití metodiky pro praktické hodnocení,
 - porovnání korozních úbytků a míry deformace povrchu od koroze,
- V oblasti aplikace fraktální geometrie pro hodnocení zvlnění plochého skla (corrugation testu):
 - využití metodiky detekce zvlnění v reálném nasazení přímo na výrobní lince a střednědobý provoz zařízení,

- ověření funkčnosti experimentálního zařízení a vysoká míra korelace se subjektivními výsledky hodnocení,
- přepočítání získaných parametrů na v současné době používanou škálu tříd jakosti,
- návrh prototypu pro nasazení na linku.
- V oblasti detekce vad objektů z transparentních materiálů:
 - návrh detekce různých typů vad v průhledných objektech.
- V oblasti popisu tvaru pomocí projekce odraženého laserového paprsku:
 - ověření dostatečné přesnosti metody pro jednoduchý případ detekce bortu plochého skla.
- V oblasti použití konfokálních snímačů:
 - ověření deklarovaných přesností konfokálních snímačů při nestíněném měření,
 - nalezení správných parametrů nastavení vyhodnocovací jednotky konfokálních snímačů pro běžné podmínky (nastavení frekvencí, prahů, průměrování, zobrazení, ...),
 - stanovení vlastností povrchů pro snímání, vliv rušivých vnějších světelných podmínek atd.,
 - ověření opakovatelnosti polohování robotů,
 - ověření deklarovaných přesností konfokálních snímačů v reálném nasazení.
- V oblasti detekce lesklých objektů pro následné uchopení:
 - alternativní řešení schopné praktického nasazení založené na senzorové fúzi pro daný typ výrobku,
 - technické řešení úchopných hlavic pro bin picking, které umožňují eliminovat nepřesnosti v navádění na objekty k odebrání,
 - odladění komerčního systému pro získání 3D obrazu pro bin picking,
 - získání aplikačního know-how pro tento typ úloh.

Vedle uvedených bodů bylo nutné vyřešit řadu technických problémů, které leží na okraji tématu práce, přesto jejich zvládnutí je nezbytné pro reálné nasazení metodiky do průmyslové praxe.

7.3 Přínosy pro pedagogickou činnost

Tato práce je koncipována tak, aby mohly být ucelené části použity pro pedagogickou činnost v oblasti vzdělávání studentů bakalářského, magisterského a doktorského studijního programu, a to formou:

- práce je koncipována tak, aby bylo možné tuto publikaci vydat jako odbornou monografii,
- použití částí textů pro výuku ve formě odborných skript,
- využití vzniklých laboratorních zařízení pro praktickou výuku.

Vedle habilitační práce také vznikla v nedávné době disertační práce Ing. Ondřeje Matúška, která je zaměřena podobně a výzkum byl často veden v týmu. V rámci řešené

problematiky byli do výzkumných týmů začleněni i další studenti doktorského, magisterského a bakalářského studia formou dílčích úkolů, závěrečných prací a také podílem na projektech SGS.

Habilitační práce splnila své cíle, tak jak byly na začátku specifikovány, během jejího řešení se podařilo vybudovat špičkové pracoviště na získání a interpretaci obrazových dat se zaměřením na průhledné objekty, objekty s povrchovou strukturou a problematickým leskem. Výzkum, kterého je habilitační práce podmnožinou, dál pokračuje, je zaměřen nyní na následný vývoj některých metodik a na přenos poznatků do praxe. Připravovány jsou také publikace do odborných časopisů.

Literatura

- [1] HOTAŘ, V. *Hodnocení průmyslových dat pomocí fraktálové geometrie*. Liberec, 2005. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [2] HOTAŘ, V. *Metodika popisu průmyslových dat pomocí fraktální geometrie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 180 s. ISBN 978-80-7372-431-3.
- [3] HOTAŘ, V. *Úvod do problematiky strojového vidění, část 1: Základní principy a hardware*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-156-6.
- [4] HOTAŘ, V. *Úvod do problematiky strojového vidění, část 2: Základy zpracování obrazu*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-202-0.
- [5] MATÚŠEK, O. *Pokročilé techniky snímání lesklých materiálů*. Liberec, 2019. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [6] SVOBODA, J. *Zařízení pro detekci přesnosti tvaru ohýbaných přířezů plochého skla*. Liberec, 2012. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [7] HALUŠKA, J. *Bezkontaktní kontrola geometrie profilu designových lišt*. Liberec, 2016. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [8] SVOBODA, J. *Zařízení pro měření celistvosti antén tištěných na skle*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [9] DIKW pyramid. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 7. 10. 2018 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/DIKW_pyramid
- [10] PSTRUŽINA, K. *Atlas filosofie vědy* [online]. Praha: Centrum informatiky, Vysoká škola ekonomická v Praze. [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://nb.vse.cz/kfil/win/atlas1/indukce.htm>
- [11] ŽÁRA, J., B. BENEŠ a P. FELKEL. *Moderní počítačová grafika*. Praha: Computer Press, 1998. ISBN 80-7226-049-9.
- [12] FOLEY, J. D. et al. *Computer Graphics: Principle and Practice*. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1990. ISBN 0-201-12110-7.
- [13] HOTAŘ, V., V. KLEBSA a I. MATOUŠEK: *Technologie automatické výroby skla*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-237-2.
- [14] HLAVÁČ, V. a M. SEDLÁČEK. *Zpracování signálu a obrazu. 2. vydání*. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03110-0.

- [15] ULLMAN, V. *Aplikace ionizujícího záření* [online]. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/JadRadMetody.htm>
- [16] BOUNDLESS PHYSICS. *The Electromagnetic spectrum. Lumen learning* [online]. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <https://courses.lumenlearning.com/boundless-physics/chapter/the-electromagnetic-spectrum/>
- [16A] HECHT, E. *Optics*. 4th Edition. San Francisco: Pearson Education, 2002. ISBN 0-8053-8566-5.
- [17] HOTAŘ, V. a O. MATÚŠEK. Využití reflexe plochého skla pro jeho detekci. *Sklář a keramik*. 2012, roč. 62, č. 7–8, s. 170–173.
- [18] Back-illuminated sensor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 25. 2. 2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Back-illuminated_sensor
- [19] BAER, R. L. et al. A comparison of primary and complementary color filters for CCD-based digital photography. In: *Proceedings IS&T/ SPIE Symposium on Electronic Imaging* [online]. San Jose (California), 1999, vol. 3650, s. 16–25. Dostupné z: <http://www.seas.gwu.edu/~poorvi/EI99.pdf>
- [20] ADEPT TURNKEY. *High resolution camera Flare 48MP30-CX* [online]. [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: http://www.adept.net.au/cameras/ioi/flare_48m.shtml
- [21] SVS–VISTEK. *SVCam industrial cameras hr120CCX* [online]. [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://www.svs-vistek.com/en/industrial-cameras/svs-camera-detail.php?id=hr120CCX>
- [22] ATESYSTEM. *Komunikační rozhraní ve strojovém vidění* [online]. [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: <http://kamery.atesystem.cz/know-how/srovnani-nejpouzivanejsich-komunikacnich-rozhrani-ve-strojovem-videni/>
- [23] COAXPRESS. *The next generation digital interface* [online]. [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.coaxpress.com>
- [24] TYDEX. *Quartz Glass for Optics* [online]. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: http://www.tydexoptics.com/pdf/Quartz_glass.pdf
- [25] HOTAŘ, V. a O. MATÚŠEK. Konfokální chromatické snímače pro aplikace ve sklářském průmyslu. *Sklář a keramik*. 2017, roč. 67, č. 3–4, s. 62–63.
- [26] STIL. *Products* [online]. 2017 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <http://products.stil-sensors.com/?lang=EN>
- [27] *Ultraviolet radiation, Physics*. In: *Encyclopedia BRITANNICA* [online]. [cit. 2017-08-01]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/ultraviolet-radiation>
- [28] DELABOUDINIÈRE, J. P. et al. EIT: Extreme-ultraviolet imaging telescope for the SOHO milion. *Solar Physics* [online]. 1995, vol. 162, iss. 1–2, s. 291–312. [cit. 2017-08-01]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF00733432>.

- [29] HAMAMATSU. *NMOS image sensors* [online]. [cit. 2017-08-01]. Dostupné z: <https://www.hamamatsu.com/jp/en/product/alpha/N/4120/index.html>
- [30] JAI: *Camera CM-140GE-UV* [online]. [cit. 2017-08-01]. Dostupné z: <http://www.jai.com/en/products/cm-140ge-uv>
- [31] BASLER. *INR-Cameras* [online]. [cit. 2017-08-01]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/>
- [32] PRINCETON INSTRUMENTS. *Solar cell inspection via photoluminescence imaging in the NIR/SWIR* [online]. [cit. 2017-08-01]. Dostupné z: https://www.princetoninstruments.com/userfiles/files/appnotes/Solar_Cell_Inspection_via_photoluminescence_imaging_in_NIR_SWIR_2014_B0.pdf
- [33] KREIDL, M. *Měření teploty – senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN–technická literatura, 2005. ISBN 9788073001452.
- [34] CENTRUM TERMOGRAFIE. *Konstrukce termokamery* [online]. [cit. 2017-08-01]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [35] University of Reading: Germanium (Ge) [online]. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: <http://www.reading.ac.uk/ir-infraredmaterials-ge.aspx>
- [36] SOVA, J. a J. KOVÁŘ. Termokamery a pyrometry. *Automa*. 2014, č. 2, s. 16–22. ISSN 1210-9592.
- [37] EYECGAS. *Optical gas imaging camera* [online]. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://eyecgas.com>
- [38] REICHL, J. a M. VŠETIČKA. *Multimediální Encyklopedie Fyziky* [online]. 2011 [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [39] Radio telescope. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 19. 1. 2018 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: https://wikipedia.org/wiki/Radio_telescope
- [40] *Elektronová mikroskopie* [online prezentace]. Praha: VŠCHT. [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/nmr/mol_model_bioinfo/lekce/mikroskopie.pdf
- [41] TECHMANIA. *Elektronový mikroskop* [online]. Plzeň: Techmania Science Center, o.p.s. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/kvanta/elektronovy-mikroskop>
- [42] High-resolution transmission electron microscopy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 2. 12. 2017 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/High-resolution_transmission_electron_microscopy
- [43] *AFM mikroskop* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/AFM_mikroskopie.pdf

- [44] SEDLÁŘ, M., E. STAFFA a V. MORNSTEIN. *Zobrazovací metody využívající neionizující záření* [online]. Brno: Masarykova Univerzita, 2014. [cit. 2018-01-22] ISBN 978-80-210-7156-8. Dostupné z: http://www.med.muni.cz/biofyz/zobrazovacimetody/files/zobrazovaci_metody.pdf
- [45] OVMT – Odborné vzdělávání s moderní technikou. *Zkoušky bez porušení materiálu*. Brno: Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno, 2013.
- [46] Ultrasonic testing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 19. 1. 2018 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasonic_testing
- [47] CURTIS, K. Použití ultrazvukových měničů pro měření vzdálenosti. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. 2015, č. 6. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:20858/pouziti-ultrazvukovych-menicu-pro-mereni-vzdalenosti>
- [48] STEJSKAL, M. *Detekce dependentních a non dependentních zón v obraze získaném elektrickou impedanční tomografií*. Kladno, 2014. Diplomová práce. České vysoké učení technické.
- [49] VOLF, J. Taktilní senzory pro automatizaci. *AUTOMA* [online]. 2008, č. 7. [cit. 2018-01-22]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/taktilni-senzory-pro-automatizaci-2008_07_37544_4863/
- [50] VOLF, J., et al. Pressure distribution measurement system PLANTOGRAF V12 and its electrodes configuration. *Agronomy Research* [online]. 2015, vol. 13, iss. 3, s. 732–738. [cit. 2018-01-22]. ISSN 1406-894X. Dostupné z: <http://agronomy.emu.ee/category/volume-13-2015/number-3-volume-13-2015/>
- [51] KELLER, P. *Souřadnicové měřicí stroje* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2522>
- [52] AEROPAN. *Vzduchové měřicí přípravky* [online]. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: <http://www.aeropan.eu/vyroby/vzduchova-meridla>
- [53] SEDLÁŘ, M. *Magnetická rezonance* [online]. Brno: Masarykova Univerzita. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: http://www.med.muni.cz/biofyz/files/nutricnisppecialista/MRI_2011_Sedlar.pdf
- [54] SONKA, M., V. HLAVAC a R. BOYLE. *Image processing, analysis, and machine vision*. Pacific Grove: Books/Cole Publishing Company, 1998. 770 s.
- [55] HARTLEY, R. a A. ZISSERMAN. *Multiple view geometry in computer vision*. 2nd Edition. Cambridge (New York): Cambridge University Press, 2003, 655 s. ISBN 978-0-521-54051-3.
- [56] GONZALEZ, C., R. E. WOODS, *Digital image processing*. 3rd Edition. Upper Saddle River: Pearson Education, 2008, 976 s. ISBN 978-0-13-168728-8.

- [57] CANNY, J. A computational approach to edge detection [online]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986, vol. PAMI-8, iss. 6, s. 679–698. [cit. 2015-04-03] Dostupné z: http://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERS_ACS/canny1986.pdf
- [58] HOTAŘ, V. a L. PIREK. Fraktály [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: <http://www.ksr.tul.cz/fraktaly/>
- [59] MANDELBROT, B. B. The fractal geometry of nature. 2nd ed. New York: W. H. Freeman and Co. 1982. ISBN-10: 0716711869.
- [60] PEITGEN, H.O., H. JUERGENS a D. SAUPE. *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. New York: Springer, 1992. DOI: 10.1007/b97624.
- [61] ZELINKA, I., F. VČELAŘ a M. ČANDÍK. *Fraktální geometrie – principy a aplikace*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN: 80-7300-191-8.
- [62] EVERTSZ, C. J. G., H. O. PEITGEN a R. F. VOSS. *Fractal geometry and analysis*. Singapore: World Scientific, 1996. ISBN 10: 9810224346.
- [63] GLEICK, J. *Chaos: vznik nové vědy*. Překlad SEDLÁŘ, J. a KAMENICKÁ, R. Praha: Ando publishing, 1996.
- [64] MANDELBROT, B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*. 1967, vol. 156, iss. 3775, s. 636–638. Dostupné z: https://www.jstor.org/stable/1721427?seq=2#metadata_info_tab_contents
- [65] GULICK, D. *Encounters with chaos*. New York: McGraw-Hill, 1992. ISBN-10: 0070252033.
- [66] ZELINKA, I. *Aplikovaná informatika, aneb, Úvod do fraktální geometrie, buněčných automatů*. 2. vydání. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 1999. ISBN 80-7318-275-0.
- [67] ZMEŠKAL, O. et al. HarFA and HARFA: E-JOURNAL [online]. Brno: Ústav fyzikální a spotřební chemie, 2002 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/>
- [68] TROUSOV, G. *Help of Benoit 1.2: software for estimating of fractal dimension*. St. Petersburg: TruSoft International, 1996.
- [69] BLAIS, F. Review of 20 Years of Range Sensor Development. *Journal of Electronic Imaging*. 2004, vol. 13, iss. 1, s. 231–243. [cit. 2019-02-20]. Dostupné z: nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=a4b60f11-9330-413e-9a20-d7e8cbe079a1
- [70] MANDÁT, D. *Optické bezkontaktní topografické metody*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3075-1.
- [71] KALOVÁ, I. a K. HORÁK. Optické metody měření 3D objektů. *Elektrorevue* [online]. 2005, č. 23. [cit. 2018-02-26]. ISSN 1213-1539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>

- [72] MATÚŠEK, O. a V. HOTAŘ. Možnosti detekce bortů plaveného skla na výrobní lince. *Sklář a keramik*. 2017, roč. 67, č. 7–8, s. 143–147.
- [73] LATIMER, W. Understanding laser-based 3D triangulation methods. *Vision System Design* [online]. 2015 [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <https://www.vision-systems.com/articles/print/volume-20/issue-6/features/understanding-laser-based-3d-triangulation-methods.html>
- [74] SO, E. W. Y. et al. Real-time 3D model reconstruction with a dual-laser triangulation system for assembly line completeness inspection. In: Lee S. et al (eds) *Intelligent Autonomous Systems 12. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2013, vol 194. Berlin Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-33931-8.
- [75] DALEY, R. C. and HASSEBROOK L. G. Channel capacity model of binary encoded structured light-stripe illumination. *Applied Optics*. 1998, vol. 37, iss. 17. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/5579487_Channel_capacity_model_of_binary_encoded_structured_light-stripe_illumination
- [76] GENG, J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. 2011, vol. 3, iss. 2, s. 128–160. [cit. 2018-02-26]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/aop/abstract.cfm?URI=aop-3-2-128>
- [77] POSPÍŠIL, P. *3D triangulační technika rekonstrukce objektů*. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [78] BARTL, J., R. FIRA and M. HAIN. Inspection of surface by the Moiré method. *Measurement Science Review*. 2001, vol. 1, iss. 1. ISSN 1335-8871. [cit. 2019-02-23] Dostupné z: <http://www.measurement.sk/PAPERS/Bartl.pdf>
- [79] BAJCSY, R. and L. LIEBERMAN. Texture gradient as a depth cue. *Computer Graphics and Image Processing*. 1976, vol. 5, iss. 1, s. 52–67. DOI: 10.1016/S0146-664X(76)80005-6.
- [80] BRAY, A. J. Tracking objects using image disparities. *Image and Vision Computing*. 1990, vol. 8, iss. 1, s. 4–9. DOI: 10.1016/0262-8856(90)90049-B.
- [81] PANIN, G. *Model-based visual tracking: The openTL framework*. USA: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-87613-8.
- [82] *Zpracování obrazových dat: STEREO VIDĚNÍ, Úlohy pro praktickou výuku zpracování obrazových dat* [online prezentace]. Praha: ČVUT, 2011 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/view/20587649/zadani-uloh-ke-cviceni-a-principy-stereo-videni-fbmi>
- [83] MENDŘICKÝ, R. a P. KELLER. *Obsluha měřicích zařízení bezkontaktní metody*. [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci. 2015 [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <http://www.ksa.tul.cz/getFile/id:2520>

- [84] IKEUCHI, K. Surface reflection mechanism. Handbook of Pattern Recognition and Image Processing. San Diego (USA): Academic Press, 1994, vol. 2, s. 131–160. ISBN 0-12-774561-0
- [85] BERTHOLD, K. a P. HORN. Height and gradient from shading. *International Journal of Computer Vision*. 1990, vol. 5, iss. 1, s. 37–75. DOI: 10.1007/BF00056771.
- [86] NAM, G. a M. H. Kim. Multispectral photometric stereo for acquiring high-fidelity surface normals. *Computer Graphics and Applications*. 2014, vol. 34, iss. 6, s. 57–68. DOI: 10.1109/MCG.2014.108.
- [87] STEMMER IMAGING: *CVS trevista* [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <http://www.stemmer-imaging.de/en/products/series/cvs-trevista/>
- [88] GIBLIN, P. a R. WEISS. *Reconstruction of surfaces from profiles* [online]. Technical Report UM-CS-1987-026. 1987 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/240211443_Reconstruction_of_surfaces_from_profiles
- [89] KUTULAKOS, K. N. Affine surface reconstruction by purposive viewpoint control. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision* [online]. Cmbridge (USA), 1995. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.27.530&rep=rep1&type=pdf>
- [90] KERIVEN, R. *A variation framework for shape from contours* [online]. Research Report CERMICS-2002-221b. 2002 [cit. 2018-12-30]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/bb86/076628ff8687e3860dfd4bcf961402669879.pdf>
- [91] BILLIOT, B. et al. 3D Image acquisition system based on shape from focus technique. *Sensors* [online]. 2013, vol. 13, iss. 4, s. 5040–5053. DOI:10.3390/s130405040.
- [92] JANÁKOVÁ, I. *Optické 3D měření* [online prezentace]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/POV/Lectures/12_Opticke_3D_mereni.pdf
- [93] ELAN, T. Engineering: The subtle art of constantly discovering you're doing it wrong. *Wordpress*. 2013 [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <https://project40.wordpress.com/2013/04/28/engineering-the-subtle-art-of-constantly-discovering-youre-doing-it-wrong-tensory/>
- [94] Tomography. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 18. 2. 2018 [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tomography>
- [95] HOZMAN, J. a J. KYBIC. Počítačová tomografie (CT) [online prezentace]. Praha: ČVUT, 2017. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/wiki/_media/courses/a6m33zsl/ct-hozman-jk.pdf

- [96] Výpočetní tomografie a Hounsfieldovy jednotky. In: *Wikiskripta* [online]. Brno: Masarykova univerzita. Institut biostatistiky a analýz. Naposledy změněna 7. 4. 2016 [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/V%C3%BDpo%C4%8Detn%C3%AD_tomografie_a_Hounsfieldovy_jednotky
- [97] VLČEK, V. V. a K. SEGETH. Matematika dokonale ukrytá v počítačové tomografii. *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie* [online]. 2008, vol. 53, iss. 3, s. 199–210. [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/141859/PokrokyMFA_53-2008-3_3.pdf
- [98] HOTAŘ, V. Korozní účinek skloviny hodnocený pomocí fraktální geometrie. In: *Sborník přednášek 3. konference Kovy ve sklářských technologiích*. Teplice: ČSS, 2004, s. 32–38.
- [99] HOTAŘ, V. a F. NOVOTNÝ. Surface profile evaluation by fractal dimension and statistic tools. In: *Proceedings of 11th International Conference on Fracture*. Turin (Italy): Centro Congressi Internazionale, 2005. s. 58.
- [100] HOTAŘ, A., V. HOTAŘ a J. DROBEČEK. Corrosion resistance of heat-resistance alloys in molten lead crystal at 1200 degrees C. In: *Proceedings of 21st International Conference On Metallurgy And Materials (Metal 2012)*. Brno: TANGER LTD, 2012, s. 1467–1470.
- [101] HOTAŘ, V., A. HOTAŘ a O. MATÚŠEK. Metodika analýzy korozního napadení kovů sklovinou pomocí fraktální geometrie. *Sklář a keramik*. 2018, roč. 68, č. 3–4, s. 51–57.
- [102] HOTAŘ, A. Možnosti využití aluminidu železa Fe₂₈Al₄Cr_{0,1}Ce ve sklářském průmyslu. Liberec, 2004. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [103] HOTAŘ, A., R. KIRSCH a P. KRATOCHVÍL. Korozní odolnost aluminidu železa Fe₂₈Al₄Cr_{0,1}Ce ve sklovině. *Sklář a keramik*. 2003, roč. 53, č. 6, s. 125–128. ISSN 0037-637.
- [104] HOTAŘ A., V. HOTAŘ a F. NOVOTNÝ. Corrosion behaviour of Fe-40Al-Zr (at.%) alloy in molten soda-lime glass. In: *Kovové Materiály-Metallic Materials*. 2014, vol. 52, s. 149–155. DOI: 10.4149/km 2014 3 149.
- [105] HOTAŘ, A. a V. HOTAŘ. Metalografické vyhodnocování koroze pomocí fraktální geometrie. In: *Sborník konference Přínos metalografie pro řešení výrobních problémů*. Lázně Libverda, 2005.
- [106] HOTAŘ, A. a V. HOTAŘ. Corrosion resistance of Fe₃Al – Based iron aluminide in soda potash molten glass and in lead molten glass. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2007, vol. 13, iss. 1, s. 493–497.
- [107] ISO 4287: 1997. *Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters*. Geneva: ISO, 1997.

- [108] HOTAŘ, A., P. KRATOCHVÍL a V. HOTAŘ. The corrosion resistance of Fe₃Al-based iron aluminides in molten glasses. *Kovové Materiály-Metallic Materials*. 2009, vol. 47, s. 247–252.
- [109] MCKAMEY, C. G. et al. A review of recent developments in Fe₃Al-based alloys. *Journal of Material Research*. 1991, vol. 6, iss. 8, s. 1779–1805. DOI: 10.1557/JMR.1991.1779.
- [110] TORTORELLI, P.F. a K. NATESAN. Critical factors affecting the high-temperature corrosion performance of iron aluminides. *Material Science and Engineering: A*. 1998, vol. 258, iss. 1–2, s. 115–125. DOI: 10.1016/S0921-5093(98)00924-1.
- [111] HOTAŘ, A. et al. High-temperature oxidation behaviour of Zr alloyed Fe₃Al-type iron aluminide. *Corrosion Science*. 2012, vol. 63, s. 71–81. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.05.027.
- [112] JANDA, D. et al. The effect of micro-alloying with Zr and Nb on the oxidation behaviour of Fe₃Al and FeAl alloys. *Intermetallics*. 2013, vol. 41, s. 51–57. DOI: 10.1016/j.intermet.2013.04.016.
- [113] HOTAŘ, A. et al. The effect of Zr on high-temperature oxidation behaviour of Fe₃Al-based alloys. *Corrosion Science*. 2015, vol. 100, s. 147–157. DOI: 10.1016/j.corsci.2015.07.016
- [114] PARK, J. J. a S. I. PYUN. Pit formation and growth of alloy 600 in Cl⁻ ion-containing thiosulphate solution at temperatures 298–573 K using fractal geometry, *Corrosion Science*. 2003, vol. 45, iss. 5, s. 995–1010. DOI: 10.1016/S0010-938X(02)00212-3.
- [115] FELICIANO, F. F. F. R. LETA a F. B. MAINIER. Texture digital analysis for corrosion monitoring. *Corrosion Science*. 2015, vol. 93, s. 138–147. DOI: 10.1016/j.corsci.2015.01.017.
- [116] LIANG, CH. a W. ZHANG. Fractal characteristic of pits distribution on 304 stainless steel corroded surface and its application in corrosion diagnosis. *Journal of Wuhan University of Technology – Material Science Edition*. 2007, vol. 22, iss. 3, s. 389–393. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11595-006-3389-3>.
- [117] LIN, N. et al. Comparison of surface fractal dimensions of chromizing coating and P110 steel for corrosion resistance estimation. *Applied Surface Science*. 2014, vol. 311, s. 330–338. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.05.062.
- [118] PIDAPARTI, R. M. et al. Classification of corrosion defects in NiAl bronze through image analysis. *Corrosion Science*. 2010, vol. 52, iss. 11, s. 3661–3666. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.07.017.
- [119] JIN, F. a F. P. CHIANG. Nondestructive evaluation of corrosion by fractal geometry. *Research in Nondestructive Evaluation*. 1996, vol. 7, iss. 4, s. 229–238. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01606390>
- [120] COSTA, J.M., F. SAGUÉS a M. VILARRASA. Fractal patterns from corrosion pitting. *Corrosion Science*. 1991, vol. 32, s. 665–668.

- [121] HOTAR, V. a F. NOVOTNÝ. Evaluation of surface defects by fractal geometry and statistical analysis. *Glass Science Technology*. 2004, vol. 77, s. 230–237.
- [122] POPOVIČ, Š. *Výroba a zpracování plochého skla*. Praha: Grada, 2009.
- [123] HOTAŘ, V. Realizovaná metodika off line objektivizovaného hodnocení jakosti plochého skla Float corrugation testem uplatněná v AGC Flat Glass Europe. 2007. (RIV/46747885:24210/07:@KSR0334)
- [124] HOTAŘ, V. *Robustní SW pro automatické objektivizované hodnocení jakosti plochého skla Float corrugation testem uplatněné v AGC Flat Glass Europe*. 2007. (RIV/46747885:24210/07:@KSR0336)
- [125] HOTAŘ, V. a F. NOVOTNÝ. *Zařízení pro ON-LINE detekci vlnitosti plochého skla*. AGC Flat glass Czech, Teplice. 2009.
- [126] HOTAŘ, V. *On-line Corrugation 1.0. software pro on-line obrazovou analýzu vlnitosti skla*. Liberec: TU v Liberci, 2010. Uživatel výsledku: AGC Flat Glass Czech, a.s., Teplice.
- [127] HOTAŘ, V. Objektivní hodnocení vlnitosti povrchu plochého skla. In: *Sborník konference Česká a slovenská konference o skle*. Teplice: Sklář a keramik. 2005, roč. 55 C, s. 29–34. ISSN 0037-637X.
- [128] HOTAŘ, V. Systém objektivního off-line hodnocení vlnitosti plochého skla. *Jemná mechanika a optika*. 2008, č. 9, s. 240–242, ISSN 0447-6441.
- [129] HOTAŘ, V. Possibilities of Industrial Data Description Using Fractal Geometry. In: *Nostradamus: Modern Methods of Prediction, Modelling and Analysis of Nonlinear Systems*, Berlin: Springer. 2012, s. 123–132. ISBN 978-3-642-33226-5.
- [130] HOTAŘ, V. Systém hodnocení vlnitosti plochého skla vyvinutý v prostředí Matlab R 14. In: *Technical Computing Prague 2005* [CD + online]. Praha: Humusoft, 2005 [cit. 2005-12-13]. 5 s. ISBN 80-7080-577-3.
- [131] HOTAŘ, V. Objective evaluation for corrugation of flat glass surfaces. In: *Proceedings 4th International Conference on Optical Measurement Techniques for Structures and Systems*. Antwerp: Universiteit Antwerpen. 2009, s. 30.
- [132] TUNÁK, M. Monitorování struktury textilních útvarů. Liberec, 2012. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [133] ČÍŽEK, V. *Diskrétní Fourierova transformace a její použití*. Praha: SNTL, 1981.
- [134] HLAVÁČ, V. *Fourierova transformace v 1D a 2D* [online]. ČVUT: Centrum strojového vnímání. [cit. 2018-11-30] Dostupné z: <http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/11DigZprObr/12FourierTxCz.pdf>
- [135] RICHTER, M. *Fourierova transformace ve 2D* [online]. VUT Brno: Ústav automatizace a měřicí techniky. [cit. 2018-11-30] Dostupné z: http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/0910_mpov/tmp/integral_tr_2DFT.html

- [136] HOTAŘ, V. Problematika snímání skla a kvalifikace povrchové struktury. *Sklář a keramik*. 2013, roč. 63, č. 9–10, s. 217–221, ISSN 0037-637X.
- [137] HOTAŘ, V. Possibilities of fractal dimension applications for quality monitoring. In: *Proceedings 8th International Carpathian Control Conference*. Košice: Technical University of Košice, 2007, s. 191–194. ISBN: 978-80-8073-805-1.
- [138] HOTAŘ, V. EEEMethod: improved approach of compass dimension calculation. In: *Proceedings of the Advances in Intelligent Systems and Computing (Nostradamus '13)*. Ostrava. 2013, vol. 210, s. 343–351.
- [139] SCHILL, F. *Chlazení skla*. Praha: Informatorium, 1993. ISBN 80-85427-34-6
- [140] SZERUDA, R. Problematika bezdotykového měření teploty skla [on-line]. *Sklář a keramik*. 1999, roč. 49, č. 9–10, s. 243–246. ISSN 0037-637X. Dostupné z: <http://pyrometrie.sweb.cz/Sklo.htm>
- [141] ROCOES. Soda Lime Glass [online]. [cit. 2018-01-01] Dostupné z: <https://rocoes.com.tw/2008e/glass/sodalime.htm#1.1>
- [142] RUMML, P. *Možnosti aplikace kamery pro blízké ultrafialové spektrum elektromagnetického záření v průmyslové praxi*. Liberec, 2019. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Předpokládané odevzdání práce 2019.
- [143] GEORGE, D. L. et al. Validation of electrical impedance tomography for measurements of material distribution in two-phase flows. *International Journal of Multiphase Flow*. 2000, vol. 26, s. 549–581. ISSN 0301-9322.
- [144] KLAR, A. and SIEDOW, N. Radiative heat transfer and applications for glass production processes [online]. 2008. [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <http://php.math.unifi.it/users/cimeCourses/2008/04/ppt/Siedow/cime-Siedow-3-Parameter.ppt>
- [145] ICHIJO, N. et al. Resolution enhancement of electrical resistance tomography by iterative back projection method [online]. *Journal of Visualization*. 2016, vol. 19, iss. 2, s. 183–192. ISSN 1875-8975. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12650-015-0308-8>
- [146] BARTUŠKA, M. *Vady skla*. Praha: Práh, 2001. ISBN 80-7252-043-1.
- [147] HOTAŘ, V. *Úvod do výroby komponent skleněné bižuterie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-534-1.
- [148] KOUCKÝ, J. et al. *Bižuterie, základní učebnice zbožíznalství*. Jablonec nad Nisou: Svaz výrobců bižuterie, 2005.
- [149] DVOŘÁK, V. Homogenita skloviny a homogenizační systémy. *Sklář a keramik*. 1999, roč. 49, č. 11, s. 284–287. ISSN 0037-637X.

- [150] SCHOTT. *TIE-25: Striae in optical glass*. Technical information, optics for device. [online]. [cit. 2018-12-30] Dostupné z: https://www.schott.com/d/advanced_optics/21cea63c-d62f-42b7-9161-8b7ef2d7eda5/1.2/schott_tie-25_striae_in_optical_glass_eng.pdf
- [151] Kulas, V. *Zpráva ze zkoušky thermokamer od firmy Micro-epsilon na vaně PV3*. Desná: Preciosa Ornela, 2015.
- [152] ENGHEN, L. *CT test Results*. Preciosa Glass Bars E-Tronix. Nikon Metrology. [PowerPointová prezentace výsledku testů]. 2015.
- [153] MENČÍK, J. *Pevnost a lom skla a keramiky*. Praha: SNTL, 1990, 392 s. ISBN 80-03-00205-2.
- [154] TEICHLER, G. *Glas im Automobil II*. Reiningen: Expert Verlag, 2001, 174 s. ISBN 3-8169-2015-2.
- [155] KHORASANI, N. *Design - Principles for glass used structurally*. Lund University, Building Science Department, 2004, p. 80. ISSN 1103-4467.
- [156] PRECITEC. *Optical-measuring-technology* [online]. 2019 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/optical-measuring-technology/>
- [157] FOCALSPEC. *Line-confocal-sensors* [online]. 2019 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.focalspec.com/product/line-confocal-sensors/>
- [158] OMRON. *Optický konfokální snímač posunutí ZW* [online]. 2019 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: https://industrial.omron.cz/cs/products/zw#specifications_ordering_info
- [159] PRECITEC. *Ultra compac CHRcodile C* [online]. 2019 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/optical-measuring-technology/chromatic-confocal-sensors/chrocodile-c/#tab2>
- [160] ZIEGLER, M. *Contactless 3D measurement with latest multi-point sensors* [online]. Glass Worldwide. 2016, vol. 6. [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: http://www.precitec.de/uploads/media/GW63_64-65_Heye_02.pdf
- [161] STIL. *Line sensors* [online]. 2017 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <http://line.stil-sensors.com/?lang=EN>
- [162] PRECITEC. *Chromatic confocal line scan sensor CHRcodile CLS* [online]. 2019 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <http://www.precitec.de/en/products/optical-measuring-technology/line-and-multipoint-sensors/chrocodile-cls/#tab1>
- [163] MATÚŠEK, O. *Zařízení pro automatickou kontrolu adheze držáku*. Liberec, 2011. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [164] HOTAŘ, V. a F. NOVOTNÝ. *Pracoviště pro testování úloh bin picking na Technické univerzitě v Liberci*. *Automa*. 2018, č. 1, s. 20–21. ISSN 1210-9592

- [165] SICK AG. *3D Vision ScanningRuler* [online]. 2019 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: https://www.sick.com/cz/cs/kamerove-systemy/3d-vision/scanningruler/c/g294253?q=:Def_Type:Product
- [166] MABEMA AB. *Bin-Picker* [online]. 2016 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.mabema.se/robotvision/produkter/bin-picker>
- [167] FANUC CZECH. *3D Area Sensor* [online]. 2019 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/vid%C4%9Bn%C3%AD/3d-area-sensor>
- [168] BASLER AG. *Basler 3D cameras* [online]. 2019 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: www.baslerweb.com https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/3d-cameras/time-of-flight-camera/tof640-20gm_850nm/
- [169] ODOS IMAGING. *StarForm Swift 3D Time-of-Flight Camera* [online]. 2019 [cit. 2019-01-15]. Dostupné z: <https://www.odos-imaging.com/product/starform-3d-time-of-flight-camera/videos/>

Projekty a granty, na kterých se autor významně podílel

- [G1] COPENICUS Evropské Unie, 4. rámcový projekt „NOVOSCAM“, 1997 – 2000.
- [G2] Výzkumný záměr MSM 242100001, „Optimalizace vlastností strojů a pracovních procesů“, 2001 – 2004.
- [G3] Grant MPO ČR v programu Projektová konsorcia s názvem „Vývoj nového typu výrobku v oblasti domáckenského skla a navazujících technologií “ v letech 2003 - 2005.
- [G4] Grantu MPO ČR v programu PROGRES „Tepelné opracování nerotačních výrobků z křišťálového skla“ v letech 2003 - 2005.
- [G5] Průmyslový grant „Uplatnění nových metod numerické simulace v procesech výroby a zpracování plochého skla“, financováno z neveřejných zdrojů, Glaverbel a.s., 2003 - 2005.
- [G6] Výzkumný záměr MSM 4674788501: „Optimalizace vlastností strojů v interakci s pracovními procesy a člověkem“, 2005 – 2011, <http://www.fs.tul.cz/vz/>.
- [G7] Průmyslový grant „Uplatnění nových metod numerické simulace v procesech výroby a zpracování plochého skla“, financováno z neveřejných zdrojů, AGC Flat Glass Czech a.s., 2006 – 2011
- [G8] Operační program VaVpl Prioritní osa 2 – Regionální VaV Centra: CZ.1.05/2.1.00/01.0005 „Centrum pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace“, 2009 – 2013.
- [G9] Grantový projekt Studentské grantové soutěže: „Automatizace a robotizace v průmyslové praxi s akcentem na sklářský průmysl“, 2010 – 2012.
- [G10] Průmyslový grant „Inovace strojů a zařízení a implementace pokročilých technologií do procesu automatické výroby a zpracování plochého skla“, financováno z neveřejných zdrojů, Sklopan Liberec a.s., 2012 – 2014.
- [G11] Operační program Výzkum a vývoj pro inovace, Pre-seed: CZ.1.05/3.1.00/13.0291, Nové technologie a speciální komponenty strojů“, 2012 – 2015, <http://preseed.cxi.tul.cz/>.
- [G12] Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost: CZ.1.07/2.2.00/28.0311, „TK-MOST“, 2013 – 2015, <http://tkmost.kez.tul.cz/>.

- [G13] Grantový projekt Studentské grantové soutěže: „Výzkum a vývoj v oblasti automatizace, robotizace a sklářských strojů“, 2013 – 2015.
- [G14] Doplnková činnost „Analýza možností snímání vad v mačkárenských tyčích“ a „Návrh potenciálních možností detekce šlír a dalších vad v polooptických/optických tyčích“ Preciosa Ornela a.s. HOTAŘ, V. a O. MATÚŠEK. *Analýza možností snímání vad v mačkárenských tyčích*. Výzkumná zpráva. 2014, s. 11. HOTAŘ, V. a O. MATÚŠEK. *Návrh potenciálních možností detekce šlír a dalších vad v polooptických/optických tyčích*. Výzkumná zpráva. 2016, s. 26.
- [G15] Program Národní program udržitelnosti I: LO1201, „Rozvoj ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace technické univerzity v Liberci“, 2014 – 2018.
- [G16] Institucionální program pro veřejné vysoké školy pro rok 2015: „Zavedení nových předmětů ve studijním programu „Biomedicínské inženýrství“: Metody zpracování dat a obrazu v medicínské praxi a Robotické systémy 2“, 2015.
- [G17] Průmyslový grant „Analýza řešení možností záznamu stop na ozubení“, financováno z neveřejných zdrojů, AZOS, s.r.o., 2015.
- [G18] Průmyslový grant „Detekce přilnavosti plastu na twindisk kotoučích pomocí kamer“, financováno z neveřejných zdrojů, Rieter CZ s.r.o., 2015 – 2016.
- [G19] Grant programu TAČR, EPSILON: TH01031152, „Nová technologie matování a prototyp strojního zařízení pro opracování povrchu skla“, 2015 – 2017.
- [G20] Grantový projekt Studentské grantové soutěže: „Výzkum a vývoj v oblasti sklářských strojů, průmyslové a servisní robotiky“, 2016 – 2018.
- [G21] Průmyslový grant „Aplikační potenciál bezdotykového měření autoskel“, financováno z neveřejných zdrojů, FOR G, s.r.o. NOVOTNÝ, F., V. HOTAŘ, M. HORÁK, M. STARÝ, O. MATÚŠEK a D. KRČMAŘÍK. *Aplikační potenciál bezdotykového měření autoskel*. Výzkumná zpráva. 2016, s. 46.
- [G22] Průmyslový grant „Analýza praskání vnitřní hrany skla“, financováno z neveřejných zdrojů, AGC Automotive Czech, a.s. NOVOTNÝ F., M. HORÁK, V. HOTAŘ, O. MATÚŠEK a M. STARÝ. *Analýza praskání vnitřní hrany skla*. Výzkumná zpráva. 2016, s. 69.
- [G23] Grantový projekt Studentské grantové soutěže: „Nové způsoby snímání transparentních materiálů“, 2016.
- [G24] Institucionální program pro veřejné vysoké školy pro rok 2017: „Užití UV kamery pro průmyslové a medicínské aplikace“, 2017.
- [G25] Průmyslový grant „Demonstrátor Bin Pickingu“, financováno z neveřejných zdrojů, Škoda Auto, a.s. NOVOTNÝ, F., M. HORÁK, V. HOTAŘ, M. STARÝ, D. KRČMAŘÍK, O. MATÚŠEK, M. TUNÁK, P. KELLER a L. HÁJKOVÁ. *Demonstrátor Bin Pickingu*. Výzkumná zpráva. 2017, s. 50.
- [G26] Průmyslový grant „Vliv kvality vrtaného otvoru na praskání skla při kalení“, financováno z neveřejných zdrojů, AGC Automotive Czech, a.s., 2017.

- [G27] Grantový projekt Studentské grantové soutěže: „Snímání tvarovaných objektů z transparentních materiálů pomocí projekce odraženého laseru“, 2017.
- [G28] Průmyslový grant Camera control of Heating-foil - Detection possibility analysis of under-foil bubbles for off-line solution, financováno z neveřejných zdrojů, Škoda Auto a.s. HOTAŘ, V., O. MATÚŠEK, M. TUNÁK, M. STARÝ, D. KRČMAŘÍK a F. NOVOTNÝ. *Camera control of Heating-foil - Detection possibility analysis of under-foil bubbles for off-line solution*. Výzkumná zpráva. 2018, s. 19.

Seznam příloh

- [P1] HOTAŘ, V., F. NOVOTNÝ a H. REINISCHOVÁ. Objective evaluation of corrugation test. *Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology Part A*. 2011, vol. 52, iss. 9. IF: 0.381.
- [P2] HOTAŘ, V. Fractal geometry for industrial data evaluation. *Computers & Mathematics with Applications*. 2013, vol. 66, iss. 2, s. 113-121. ISSN: 0898-1221, IF: 2.069.
- [P3] HOTAŘ, V. a P. SALAČ. Surface evaluation by estimation of fractal dimension and statistical tools. *The Scientific World Journal*. 2014, vol. 2014, s. 10. DOI: 10.1155/2014/435935, IF 2013: 1.219, IF 2012: 1.730.
- [P4] HOTAŘ, A. a V. HOTAŘ. Fractal geometry used for evaluation of corrosion resistance of Fe-14Al-6Cr wt.% against molten glass. *Manufacturing technology*. 2015, roč. 15, č. 4, s. 534-541. ISSN 1213-2489.
- [P5] HOTAŘ, V. a A. HOTAŘ. Fractal dimension used for evaluation of oxidation behaviour of Fe-Al-Cr-Zr-C alloys. *Corrosion science*. 2018, vol. 133, s. 141-149, ISSN 0010-938X. IF: 5.245.

Objective evaluation of the corrugation test for sheet glass surfaces

V. Hotař,^{1*} F. Novotný¹ & H. Reinischová²

¹ Technical University of Liberec, Liberec, Czech Republic

² AGC Flat Glass Czech, a. s., Sklářská 450 - 416 74 Teplice, Libor Sehnal, Czech Republic

Manuscript received 20 May 2010

Revision received 8 February 2011

Manuscript accepted 8 February 2011

An objective system for evaluating corrugations in float glass sheets is described. The system uses a zebra plate and image analysis including fractal analysis to assess the quality of float glass in an objective manner. The system has been used successfully in an off-line production environment for two years.

1. Corrugation test

Optical measurement using a zebra plate is one of many important and widely used measurements for mass production and it is used in a wide range of situations: by manufacturers of float glass as a production control; by glass processors as a quality control for the glass they buy and as a production control of products (laminated glass, thermal treated glass, etc.); and as a production control by the final customer as a quality control for the glass they buy.

The corrugation test is based on the reflection of light off a glass sample sheet from a skew striped plate (the zebra-plate, Figure 1(A)). The test is focused on the reflection, while other types of tests are based on transmission of light through the glass. The zebra plate is 1×2 m with 25 mm wide black strips at an angle of 45 degrees and it is 4 m from the sheet. An observer (Figure 1(B)) is 4 m from the table with the sheet (Figure 1(C)) and the quality of the sheet is subjectively evaluated on the basis of comparison with etalons. The quality of the sheet is classified using a rate from 1.5 to 3.5. The evaluation is conducted in a dark-room and it is performed off-line. Commonly, the corrugation of a flat glass changes over relatively long times and, usually, the whole width of the glass ribbon that is being produced, hence the test is carried out typically several times per shift. Samples of flat glass are obtained from an on-line production process and they are cut from the whole width. The bottom and top parts of the sheet have different properties. The quality can be tested for the top part, the bottom part or for both parts, depending on requirements of the next manufacturing stage or requests of users. In the testing production line, the bottom part of the sheet is always tested, because it is usually worse than the top part. Consequently, the sheet is laid on the table bottom up and turned 90°

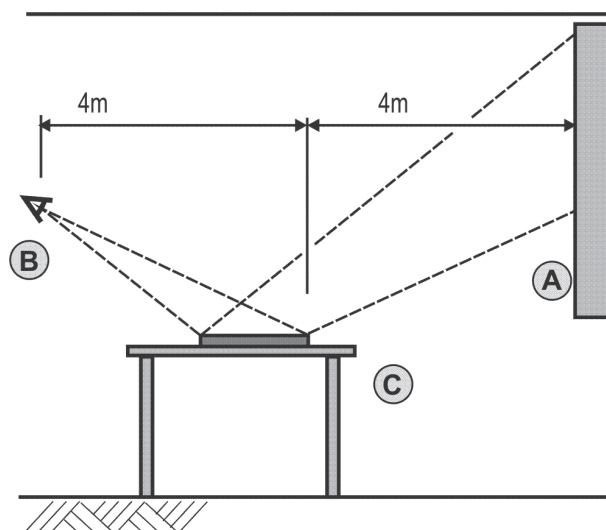


Figure 1. Scheme of corrugation test, A - zebra-plate, B - observer, C - table with window-glass sheet

(an observation is made crosswise to the production direction). Figure 2 shows good and poor quality bottom parts of a glass sheet during the corrugation test. The relatively extreme 'distortion' is caused by using a small angle of observation.

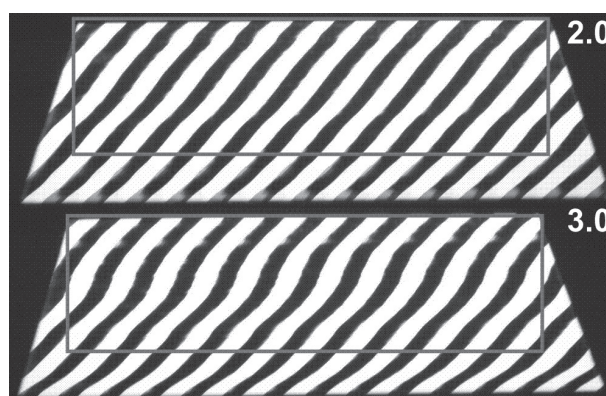


Figure 2. Good and poor quality bottom parts of glass sheets with a specification of the measured parts

¹ Corresponding author. Email

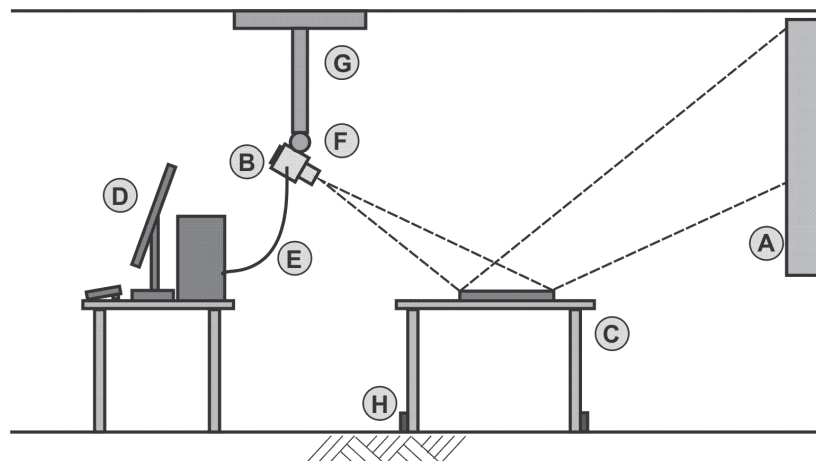


Figure 3. Schematic diagram of the measurement system for objective monitoring

2. The measuring system developed for objective monitoring

On the basis of our experiments a measuring system, which consists of both hardware and software, has been developed. The system is an important intermediate stage for developing on-line measurement and its calibration. It is also a suitable solution for processors and customers, as it does not involve expensive on-line measurement. The hardware of the system includes the zebra-plate (Figure 3(A)) and a

table for the glass sheet sample (Figure 3(C)) as in the standard subjective test. The operator is replaced by a scanning unit (digital camera Canon Power Shot 1 with AC power adaptor, Figure 3(B)), a control unit (PC, D), a connection between the digital camera and the control unit (E), a ball head (F), a camera support system (placed on a top-wall, G), and a system for gripping the table (H) to hold it in a defined position.

For the corrugation analysis special software for data acquisition and analysis was designed and

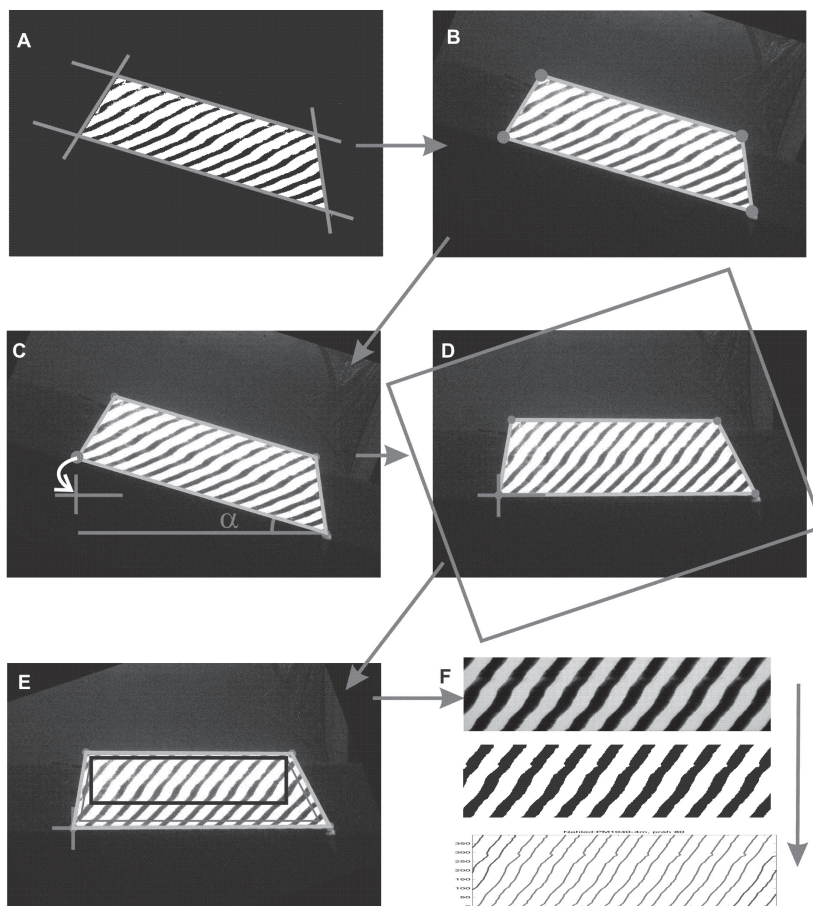


Figure 4. Image analysis: thresholding, detection of edges, rotation and shifting, obtaining parts of the image, generation of curves

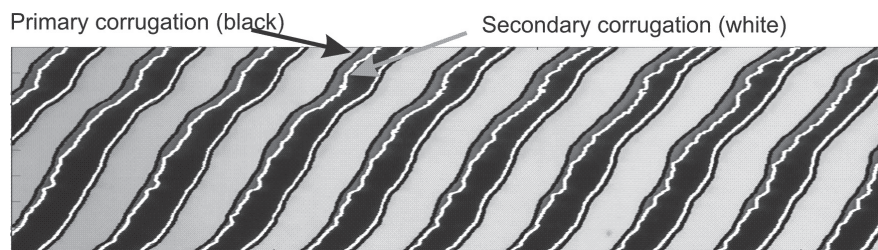


Figure 5. Primary and secondary corrugations of the bottom part of a glass sheet

developed using the development software Matlab, based on image analysis.^(1,2,3) The code is compiled as an independent program named Corrugation.

An observer (an operator) lays a sheet to be tested on the table in the defined place, fills in a form in the Corrugation software and starts the evaluation by pressing a button. This initiates the communication with the camera and the image is taken on request from the software. After downloading the image from the camera to the computer, the image analysis starts. The analysis uses the developed method and its principle is based on the detection of boundary curves between the light and the dark areas of the sheet in the image (using standard image analysis⁽¹⁾) and their evaluation employing a statistical approach, a measurement of curve length and an estimation of its fractal dimension.^(4,5) After 30 to 60 s the operator can read an evaluated quality on the computer screen.

3. Image analysis

The analysis^(1,2,3) of a scanned image is used for the detection of the glass sheet position, for the necessary rotation and shifting, and for the generation of curves from the detected boundaries between the light and dark areas. No kind of filtering is used before or during the image analysis. The analysis uses JPG format (in the black and white mode) that is faster for downloading from the camera and it is also faster for processing. Detailed tests and analysis carried out with JPG format and TIFF, a non-compressed format, produce similar results. This shows that the data format does not have any significant influence on the evaluated glass quality.

After downloading the images from the camera, the glass sheet is located using thresholding and edge detection, Figures 4(A), (B). The location of the lower left corner and the angle of the lower edge are used to rotate and shift the sheet image to the specified position, Figure 4(C), (D) (the angle on the figure is bigger than in the real application, to more clearly illustrate the methodology). One part is selected manually or automatically for further analysis, Figure 4(E). The curves are generated using thresholding and contour detection Figure 4(F). For obtaining curves two thresholds are used, because two different types of defects can be found on the surface of the bottom part of the glass sheet: a primary, and a secondary

corrugation, Figure 5. (The reflected image can have different characters for heat treated glass and also the top and the bottom parts can differ.) For the evaluated bottom part, both corrugations are the result of the production technology, lifting cylinders affect mainly the primary corrugation and the float bath (molten tin) influences a thin layer of the bottom part in contact with the tin melt, the secondary corrugation. The methodology enables both corrugations to be described separately and it evaluates the impact of the technological process on the production quality. The secondary corrugation was not separated using by difference from the primary one, but it could be done. The Corrugation Test must lie within certain limits, however these has not been specified previously, which makes the evaluation of the quality more difficult.

The tests have proved that more than one parameter is needed to describe all corrugation types. For the assessments of a flat glass quality the following three parameters of the curves generated from the reflected image are important: first complexity (smoothness) of the separated curves from the contours (characterised using fractal dimension), second the range of waviness from an ideal line (characterised using range) and third the rate of deformation (characterised using curve length). All parameters are measured in pixels. The above mentioned measurements were chosen after an extensive analysis as they gave the best conformity between a subjective evaluation conducted by an experienced operator and the evaluated quality using computed parameters.

The fractal dimension describes complexity using a single number, and it can be estimated by the use of many methods.^(4,5) The compass method⁽⁵⁾ is one of them, this is based on measuring the dividing line (roughness profile) using different sizes of rulers (Figure 6(A)) according to the equation

$$L_i(r_i) = N_i(r_i)r_i \quad (1)$$

L_i is the length of the i th measurement, r_i is the ruler size and N_i is the number of steps needed for the measurement given by the power law:

$$N(r_i) = \text{const } r_i^{-D_R} \quad (2)$$

If the line is fractal, so that the estimated fractal dimension is larger than the topological dimension, the length measured increases as the ruler size is

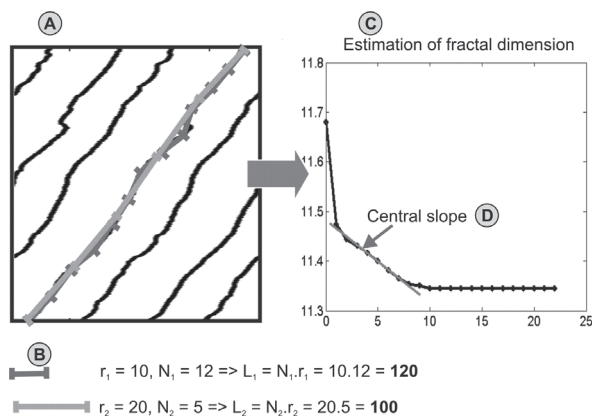


Figure 6. Estimation of fractal dimension using the compass method

reduced (Figure 6(B)). Combining Equations (1) and (2) gives

$$L_i(r_i) = N_i(r_i) r_i = \text{const } r_i^{-D_R} r_i = \text{const } r_i^{1-D_R} \quad (3)$$

where D_R is the estimated dimension, the compass dimension.

The logarithmic dependence between $\log_2 N(r_i)$ and $\log_2 r_i$ is called a Richardson-Mandelbrot plot (Figure 6(C)). The compass dimension is then determined from the slope s of the regression line

$$D_R = 1 - s = 1 - \frac{\Delta \log_2 L(r)}{\Delta \log_2 r} \quad (4)$$

Although the typical dependence consists of a three-part slope, only the central region is important for computing the compass dimension (Figure 6(D)). The central part of the graph can be further reduced, depending on required evaluation scales.

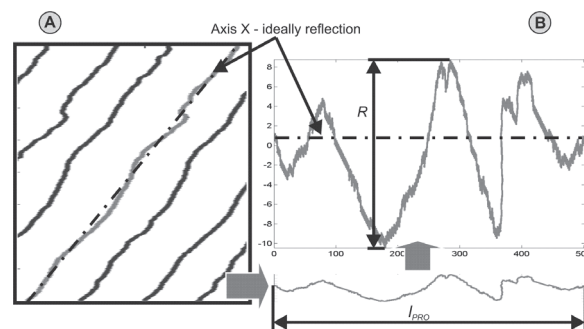


Figure 7. Conversion of the curve to a sequence of points and its evaluation using range R and relative length L_R

The compass dimension D_R is multiplied by 1000 for a better contrast, D_{R1000} . Other methods for the estimation of the fractal dimension such as the R/S method and the aggregated variance method⁽⁶⁾ were also experimentally tested.

For the statistical analysis, the curves are converted into sequences, Figure 7, where the axis X is defined from an ideal reflection. The computed parameters for the range, standard deviation, coefficient of variation and variance are acceptable for characterisation of the waviness range. The range R was chosen for its simplicity.

A rate of deformation of the curves can be evaluated from the relative curve length L_R . This fast and reliable method measures the ratio of the curve length l_{PIXEL} using the smallest ruler 1 pixel r_{PIXEL} and the length of projection l_{PRO} (Figure 7)

$$L_R = \frac{l_{PIXEL}}{l_{PRO}} \quad (5)$$

All the parameters for one sample are defined as

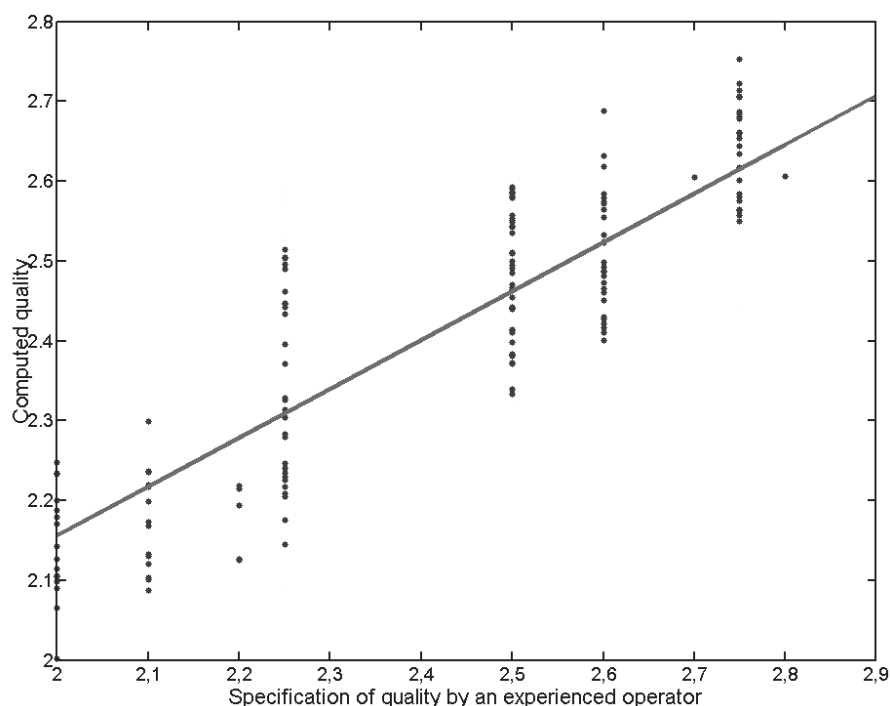


Figure 8. Relation between computed quality and the specification of quality by an experienced operator

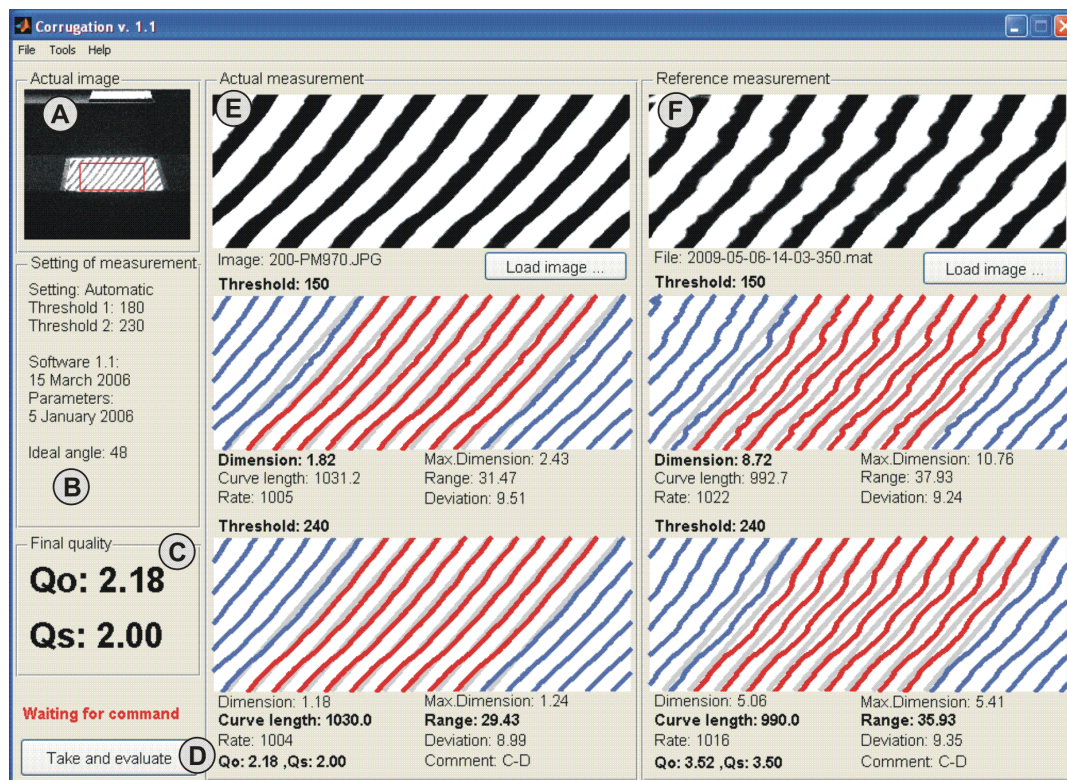


Figure 9. Graphical interface of software Corrugation 1.1, A – current image taken by the camera, B – information about setting, C – evaluated quality (objective, Q_o) and estimated quality (subjective, Q_s), D – button to start taking the photograph and to carry out the analysis, E – results of the current measurement, F – results of reference measurement

average values of all curves. Six quality parameters (the average values from the two thresholds) are obtained and used for the final evaluation of the quality.

Until now, the quality has been subjectively evaluated by an operator on the basis of their experience and their subjective balance between the primary and the secondary corrugation. Determining the limit for both corrugations is highly difficult. For this reason, we used hundreds of measurements from one experienced operator with their specification of quality in the current scale between 1.5 and 3.5 and all were analysed by the developed software. An example of computed quality in relation to the quality of the subjective assessment is shown in Figure 8. The six quality parameters for each bottom part of the glass sheet obtained from the corrugation test were recalculated by means of weighted coefficients in accordance with the results obtained previously with the use of the subjective methodology. Six coefficients of the obtained parameters were defined using the specially developed software to identify the smallest possible differences between the evaluated quality obtained by means of the image analysis and from the subjective monitoring by an experienced operator.

4. Software 'Corrugation'

Based on the experiments, the first version of the software for the evaluation of quality was developed

using Matlab and was named Corrugation 1.1 (Figure 9). It was compiled to an independent program that was used off-line in a dark-room near the production line. Now the software uses version 3.2 and has the following features: direct communication with the camera by means of a special program, an easy to use graphical interface, preservation of the previously used quality scale, analysis and editing of saved images and results, the ability to save results with inserted data about the production, the ability to export data to MS Excel, and the possibility to set the software parameters.

5. Conclusion

The system has been successfully tested for two years on the production line with the accuracy of 0.1–0.3 in latest version and the system has been enhanced with new features. During this test, the same image format and methodology has been used. The results of over a thousand of measurements from the real production process show good potential for the application of this methodology on-line. The program Corrugation has been refined step by step. The analysis of the edge corrugation has been integrated into the software and the format of data obtained from the system has been improved.

The fractal dimension is widely used in science, but industrial applications have been rather rare.⁽⁷⁾

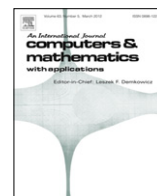
Image analysis using the fractal dimension has a great potential in combination with statistical and other measurements in industry. This methodology has been used in our research for monitoring three basic data format types: digitised photos⁽⁸⁾ (e.g. digital, classical photographs, images from electron microscopes), time series (e.g. analyses for monitoring and control systems)⁽⁹⁾ and topological one dimensional dividing lines⁽¹⁰⁾ (e.g. profiles, roughness and the dividing line between light and shadow). Modified methods using common findings of the fractal geometry are applied to each data type.

Acknowledgements

The basic research of the project has been done under research project No. MSM 4674788501, which is financed by the Ministry of Education of the Czech Republic.

References

1. Sonka, M., Hlavac, V. & Boyle, R. *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Pacific Grove Books/Cole Publishing Company, 1998.
2. Acharya, T. & Ray, A. K. *Image Processing: Principles and Applications*. John Wiley, Hoboken, 2005.
3. Seul, M., O'GORMAN, L. & Sammon, M. J. *Practical Algorithms for Image Analysis: Description, Examples, and Code*. Cambridge University Press, New York, 2005.
4. Mandelbrot, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Co., New York, 1982.
5. Peitgen, H. O., Juergens, H. & Saupe, D. *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, 1992.
6. Evertsz, C. J. G., Peitgen, H. O. & Voss, R. F. *Fractal Geometry and Analysis*. World Scientific Publishing Co.Pte. Ltd., Singapore, 1996.
7. Levy Vehel, J., Lutton, E. & Tricot, C. *Fractals in Engineering*. Springer-Verlag, New York; Berlin; Heidelberg, 1997.
8. Hotař, V. & Novotný, F. Evaluation of surface defects by fractal geometry and statistical analysis. *Glastech. Ber. Glass Sci. Technol.*, 2004, **77 C**, 230–7.
9. Hotař, V. & Novotný, F. Usage of fractal geometry and statistics for quality monitoring. *Proc. Seventh ESG Conf. on Glass Science and Technology*. Athens, 2004, 138.
10. Hotař, A., Kratochvíl, P. & Hotař, V. The corrosion resistance of Fe₃Al based iron aluminides in molten glasses. *Kovové Mater.*, 2009, 247–52.



Fractal geometry for industrial data evaluation



Vlastimil Hotař*

Technical University of Liberec, Department of Glass Producing Machines and Robotics, Studentska 2, 460 17 Liberec 6, Czech Republic

ARTICLE INFO

Keywords:

Fractal geometry
Image analysis
Time series
Quality monitoring
Industrial application

ABSTRACT

Due to continuously increasing pressure from competitors to improve the quality of products, there is a demand for objective measurement and control methods for materials, processes and production processes. However, it is almost impossible to describe many structures (e.g. defects, surfaces, cracks, time series from dynamic processes) by conventional methods because they are complex and irregular. A new approach is the application of fractal geometry which is successfully used in science. Even though its applications in industry are quite rare and experimental, fractal geometry in conjunction with statistics can be used as a useful and powerful tool for an explicit, objective and automatic description of production process data (laboratory, off-line and potentially on-line). Despite the fact that this research focuses on data from the glass industry, the methodology and principles for data evaluation from industry can be applied to industry in general.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Off-line and automatic on-line quality monitoring and control are a standard part of production lines. The choice of how to monitor is dependent on the analyses used and should correspond with the character of the data obtained. In all industrial areas the character of the data set obtained from production processes or from products can be highly structured. For this kind of data set, a powerful tool for analysis of complexity – fractal geometry (especially a fractal dimension) should be used [1–3]. The fractal dimension (FD) with a combination of statistical tools is experimentally used and is an interesting and powerful tool for complex data quantification, for tracing the source of poor quality, production optimization and investigating the source of instability of production process subsystems in industrial applications. The application of the FD to industry is generally experimental [4,5], but application to production is possible and brings benefits. Currently, there are tools to monitor three basic data format types: digitalized photos (evaluation of 2D pictures of surface defects), time series (analysis for control systems) and topological one-dimensional dividing lines (application for the corrugation test of flat glass and surface roughness—iron aluminides in comparison with carbide-nickel steel in contact with molten glass) [6].

2. Fractal dimension used for industrial data evaluation

The fractal dimension is closely connected to fractals that were defined by Benoit Mandelbrot [1], though scientists found some geometric problems with specific objects (e.g. the measurement of coast lines using different length of rulers by Richardson). A potentially powerful property of the FD is describing complexity by using a single number that defines and quantifies structures. The number is mostly a non-integer value and the FD is higher than the topological dimension. For example, the Koch curve (one of the most famous mathematical deterministic fractal) has the topological dimension $D_T = 1$, but the FD $D_F = 1.2619$. A smooth curve as a line has the topological dimension $D_T = 1$ and the FD $D_F = 1$. The FD

* Tel.: +420 485354129.

E-mail address: vlastimil.hotar@tul.cz.

can be computed for a set of points, curves, surfaces, topological 3D objects, etc., and if the FD is higher than the topological dimension, we name the objects fractals.

A comparison of statistical tools and the FD is possible, but should be done with care. The FD gives added information about the character of describing data sets and to say that the FD is better than statistics and vice versa is impossible. Furthermore, the FD should not be used separately because the dimension does not give all the information about data set captures. Using added parameters (statistics, topology, spectral analysis, etc.) together with the dimension brings benefits and is recommended. A decisive number (a testing number) for production control or quality monitoring (for example) can be computed from the obtained parameters (including the FD) by weight coefficients. This text shows methods that use the “cooperation” between the FD and statistics and gives examples of their application.

3. Description of time series

A lot of production processes have dynamic subsystems, which have an influence on the production. The production process can be influenced by the unpredictability of the subsystems and the measured data (time series) from production sensors containing this dynamic effect. The time series are structured and the typical statistical data evaluations are not often sufficient. Good quality products are the results of accurate settings of a production process and sensors, which often produce time series in time monitors. The aim of our research is to develop software tools which quickly and accurately describe time series from production processes' sensors using fractal geometry and statistical analyses. Fractal geometry uses the FD which describes the character (complexity) of time series with one number. To analyse time series we use statistical methods, power spectral analysis and an estimate of the FD [6]. The estimation of the FD is calculated using the rescaled range method, the aggregated variance method and the box counting method from an “iso-set” [7].

There are numerous possible applications of a fast and accurate description of time series from production process sensors using fractal geometry and statistical analyses. Fig. 1 shows the results of a tank furnace siege time series analysis, where the standard deviation, the R/S dimension, the aggregated variance dimension and the box dimension were used. The average temperature indicates a temperature profile of the siege and an implicit temperature profile of the molten glass during the siege. The FD result is a relatively large decrease from positions 5 and 6 and a subsequent rise between positions 6 and 8. The large decrease indicates a simple time series and the higher dimension represents a complex time series. The decrease occurs where a change of longitudinal currents is expected. The complex time series represent changes in temperature and the movement of molten glass causes the changes. This shows that fractal analysis can be used for the detection of molten glass currents [6,8].

4. Evaluation of 2D pictures and defects

The explicit, objective and automatic description of image complexity can be achieved by different methods, both statistical and using the FD. Only a few examples of the possibilities are presented below.

In practice, the process of description has five steps:

- Preparation of samples – the structure must be visible, costume jewellery is cut, Fig. 2A.
- Taking photographs. For example, photos of the fissures in costume jewellery are taken by an electron microscope, Fig. 2B.
- Software preparation of the digital photographs, Fig. 2C (cutting of the photographs, because only some parts of the photos are important for analysis).
- Analyses of the images.
- Evaluation of the results of analysis.

A digital image is a matrix (or matrices) of pixels (a rectangular array of points, Fig. 2D). Pixels can be ascribed different numbers which depend on the format used for the digital images. The pixels have numbers between 0 (black) and 255 (white) for the grey 8-bit palette bitmap and the bitmap has only one matrix. Fig. 2C shows two typical, poor quality surfaces of costume jewellery fissures. The cutting C-1 has deep cracks and C-2 has a thin structure.

Matlab and HarFa software [9] were used for these experimental evaluations. A methodology for analysis of the pictures was developed based on: histogram evaluation, percentage of black pixels, percentage of large defects, the FD. Only the last two analyses are suitable for describing these kinds of structures.

The grey images in Fig. 2C must be transformed to binary before the analysis of the percentage of large defects and the FD. The technique for this transformation is based on what is called “thresholding”; the binary image can be determined from a grey 8-bit palette bitmap, where all the black pixels fulfil specific criteria e.g. $0 \leq \text{black} \leq 35$ and all the other pixels become white ($35 < \text{white} \leq 255$). We used the threshold 35.

The percentage of large defects is suitable for the detection of individual, relatively large cracks and defects. This method computes the percentage of pixels with neighbouring pixels of the same value. The analysis searches for black pixels in binary images, which have five or more neighbouring black pixels. Large defects contain black pixels with five or more neighbouring black pixels that represent defects, structures, cracks, etc. (in Fig. 3).

The FD must be estimated for natural fractals and, of course, for data from the production processes or products. For this reason, many analyses can be used but the most suitable for these kinds of data and structures is the box counting method

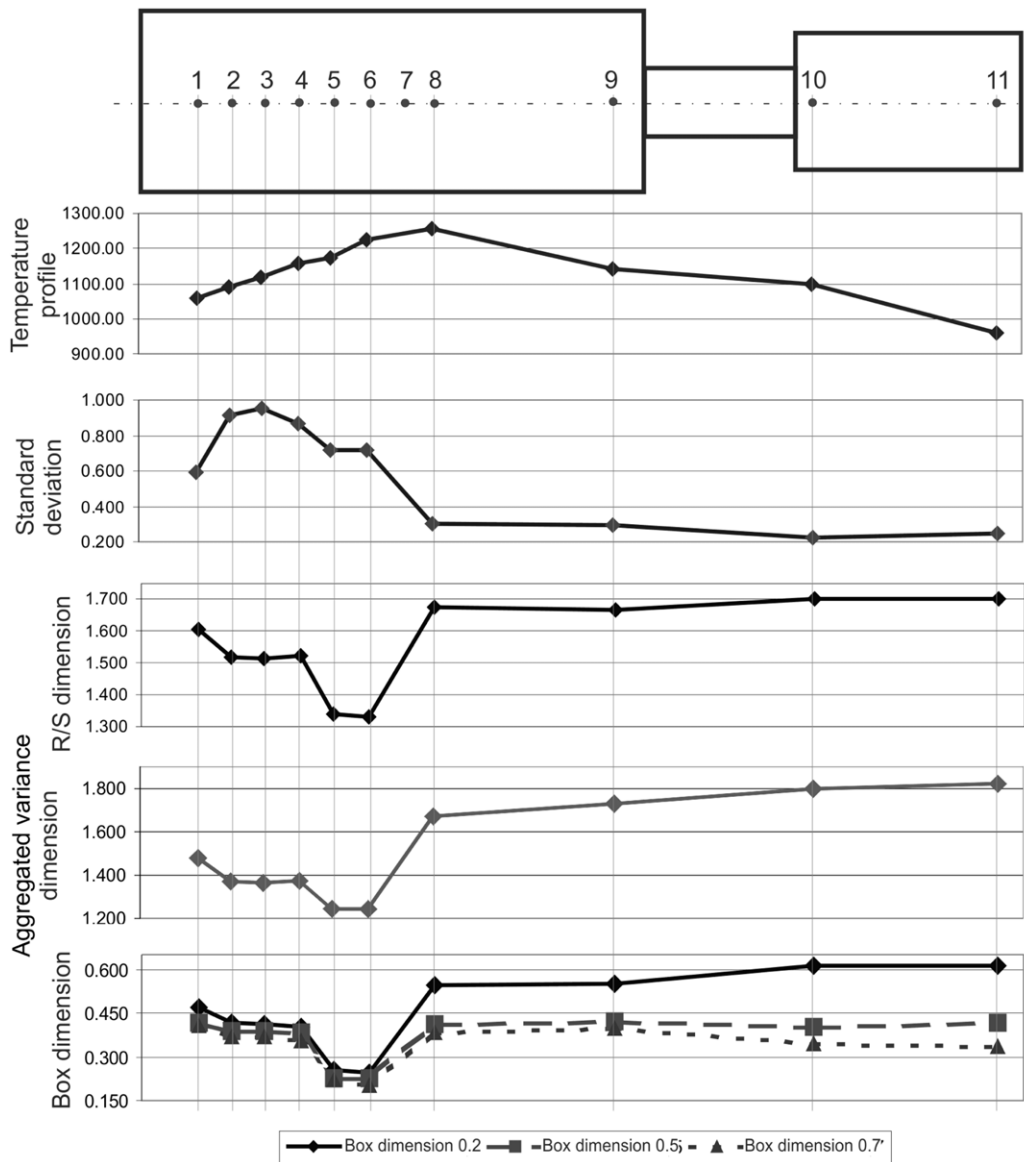


Fig. 1. Results of a tank furnace sieve time series analysis.

(in Fig. 4). The estimated FD is named the box dimension [3] and for research purposes the dimension was multiplied by 1000 [10].

Although an automatic classification of glass defects is from the laboratory, the presented example (Fig. 5) shows the possibilities of this method, its sensitivity to the different shapes of glass defects. The example can be the most easily realized using defined boundaries for the results of analyses. The simulated classification is on the right side of Fig. 5. For research purposes the dimension was also multiplied by 1000.

5. Classification of topological one-dimensional dividing lines

The research focuses on the application of the methodology for a quantification of metal surface changes and on an objectification corrugation test for flat glass.

5.1. Surface roughness changes after corrosion tests

The methodology was used for the quantification of metal surface changes. Relatively new materials: iron aluminides [11] are compared with currently used chrome-nickel steels in contact with molten glass. The samples roughness is changed

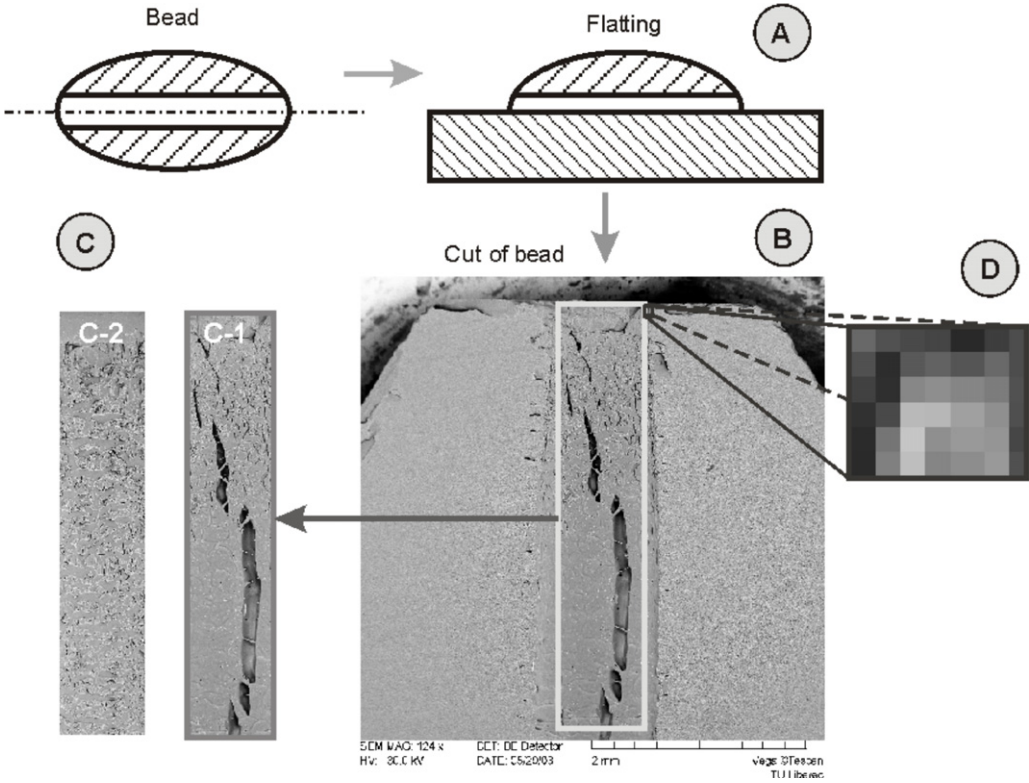


Fig. 2. Preparation of samples, taking photographs, software preparation.

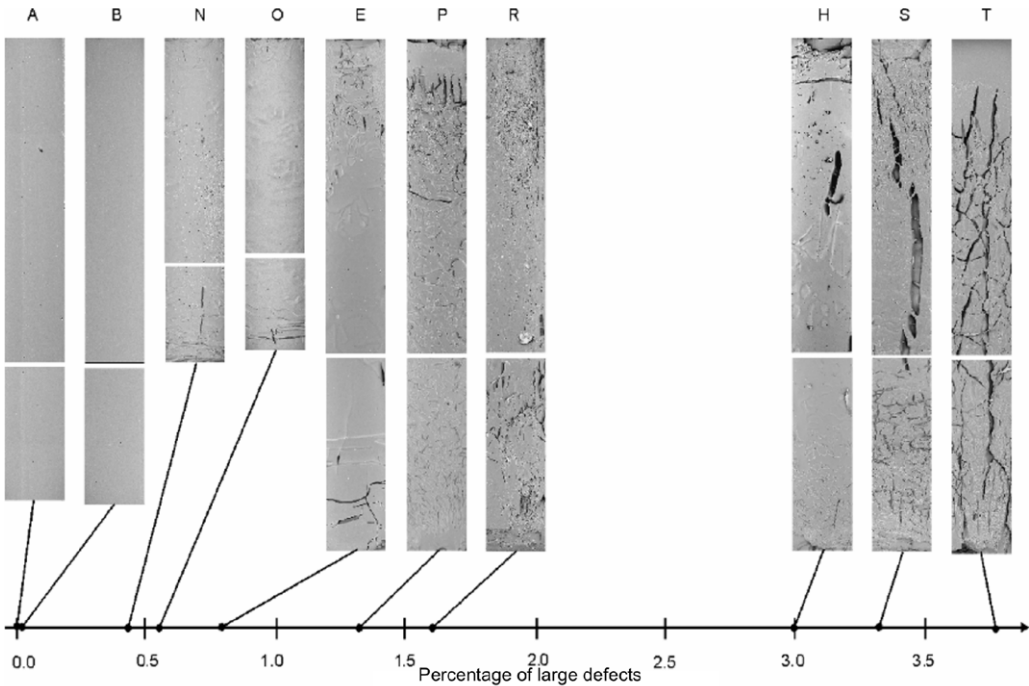


Fig. 3. Computation of the percentage of pixels with neighbouring pixels of the same value—percentage of large defects.

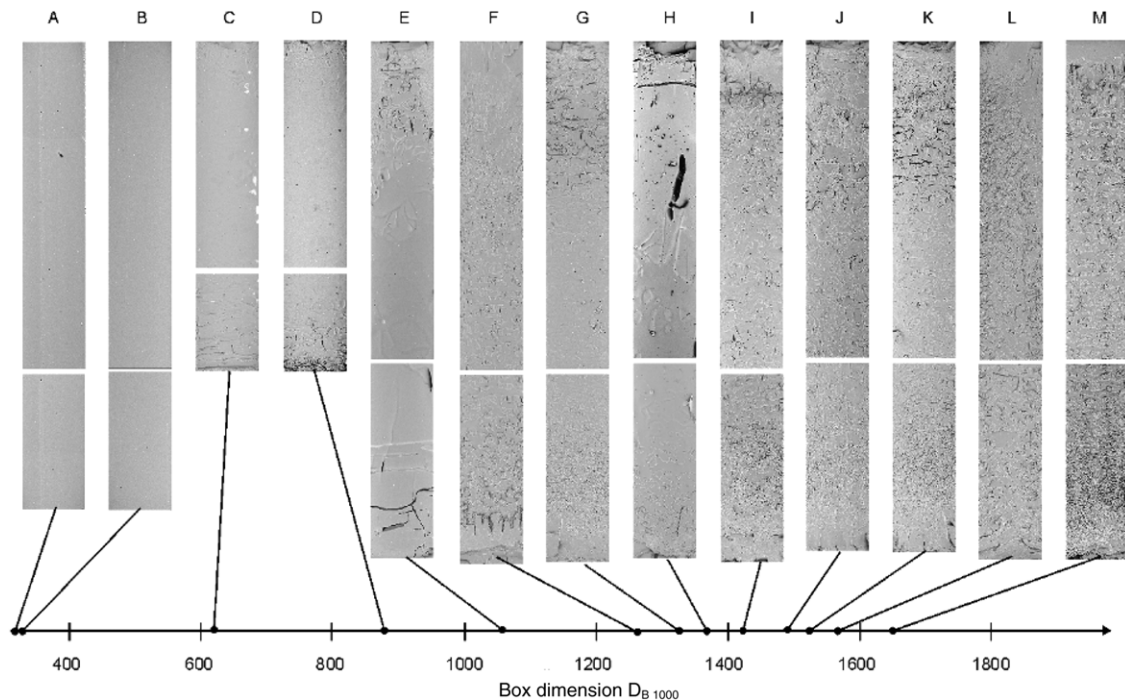


Fig. 4. Computation of box dimension $D_{B\ 1000}$ (dimension multiplied by 1000).

after interaction with molten glass during the corrosion tests. For a quantification of the metal surfaces, the roughness was evaluated using fractal geometry and statistical tools.

Firstly, a digital camera takes a photograph of a metal surface profile from a microscopic, metallographic sample (5 photographs from one sample). Secondly, a dividing line is generated from the digital photograph by a software tool that exactly defines the curve between material alloys and its surrounding. A generated dividing curve is described by the FD (a compass dimension multiplied by 1000, $D_{C\ 1000}$) that expresses the complexity degree of the interface between alloy and glass by means of a single number. The average standard deviation of all the curves (STD) and the average maximum roughness of all the curves (R) describe them using statistics [12,13]. The resulting parameters are shown in Fig. 6.

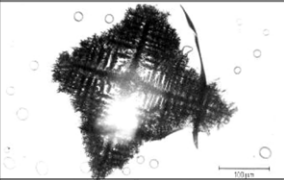
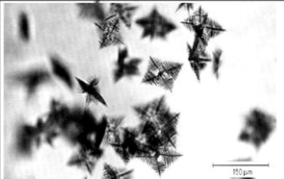
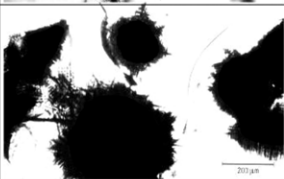
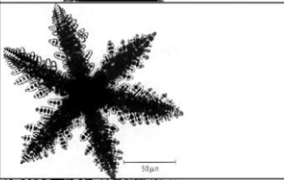

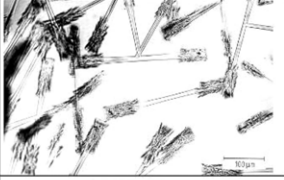
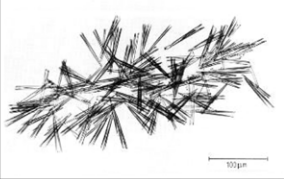
5.2. Corrugation test

Optical measurement using a zebra plate is one of many important and widely used measurements for mass production and it is used in a wide range of situations: by manufacturers of float glass as a production check; by glass processors as quality control on the glass they buy and as production control of products (laminated glass, thermal treated glass, etc.); and by the final customer as quality control on the glass they buy.

The Corrugation Test is based on the reflection of light off a glass sample sheet from a skew striped plate. The test is focused on the reflection while another type of test specializes on the passage of light through the glass. The zebra plate is $1\text{ m} \times 2\text{ m}$ with 25 mm wide black strips at an angle of 45° and it is 4 m from the sheet. An observer is 4 m from the table with the sheet and the quality of the sheet is subjectively evaluated on the basis of comparison with etalons. The quality of the sheet is classified using a rate from 1.5 to 3.5 (without units). The evaluation is conducted in a dark-room and it is performed off-line. Samples of flat glass are obtained from an on-line production process and they are cut from the whole width. Fig. 7 shows good and poor quality of glass sheets during the corrugation test. The relatively extreme “distortion” is caused by using a small angle of observation.

On the basis of our experiments a measuring system which consists of both hardware and software has been developed. A digital camera connected to a PC replaces the operator. For the corrugation analysis, a unique software application for data acquisition and analysis was designed and developed using the development software, Matlab, based on image analysis [14,15]. The code is compiled as an independent program named, “Corrugation”. An observer (an operator) lays a sheet to be tested on the table in the defined place, fills in a form in the Corrugation software and starts the evaluation by pressing a button. This initiates the communication with the camera and the image is taken on request from the software.

After downloading the image from the camera to the computer, the image analysis starts. The analysis uses the developed method and its principle is based on the detection of boundary curves between the light and the dark areas of the sheet in the image (using standard image analysis). The obtained curves are evaluated by a statistical approach, by measuring the

Defect	Image	Box dimension $D_{B\ 1000}$ (thresholds 35)	Percentage of large defects	Automatic classification
Separated crystal of cristobalite		1566	9.64	C2
Crystal of $Ba[BeF_4]$		1570	8.63	C2
Spherically formed crystal clusters of cristobalite		1314	42.80	A5
Crystal of $Ca_3(PO_4)_2$		1623	22.84	D4
Part of tridymite crystal		1470	18.27	B3
Crystal of $Ca[BeF_4]$		1438	4.78	B1
Staminate crystal of $BaO_2 \cdot TiO_2 \cdot 3SiO_2$		1659	5.93	D2

An example of an automatic defects classification formula:

FD
 $A < 1400$
 $1400 \leq B < 1500$
 $1500 \leq C < 1600$
 $1600 \leq D$

Large defects
“1” < 5
 $5 \leq \text{“2”} < 10$
 $10 \leq \text{“3”} < 20$
 $20 \leq \text{“4”} < 30$
 $30 \leq \text{“5”}$

Fig. 5. Description of glass defects using the box dimension $D_B\ 1000$ (dimension multiplied by 1000), percentage of large defects and automatic classification.

curve length and by estimating its FD (the compass dimension mentioned above) [1,3]. After 30–60 s, the operator can read an evaluated quality on the screen of the computer.

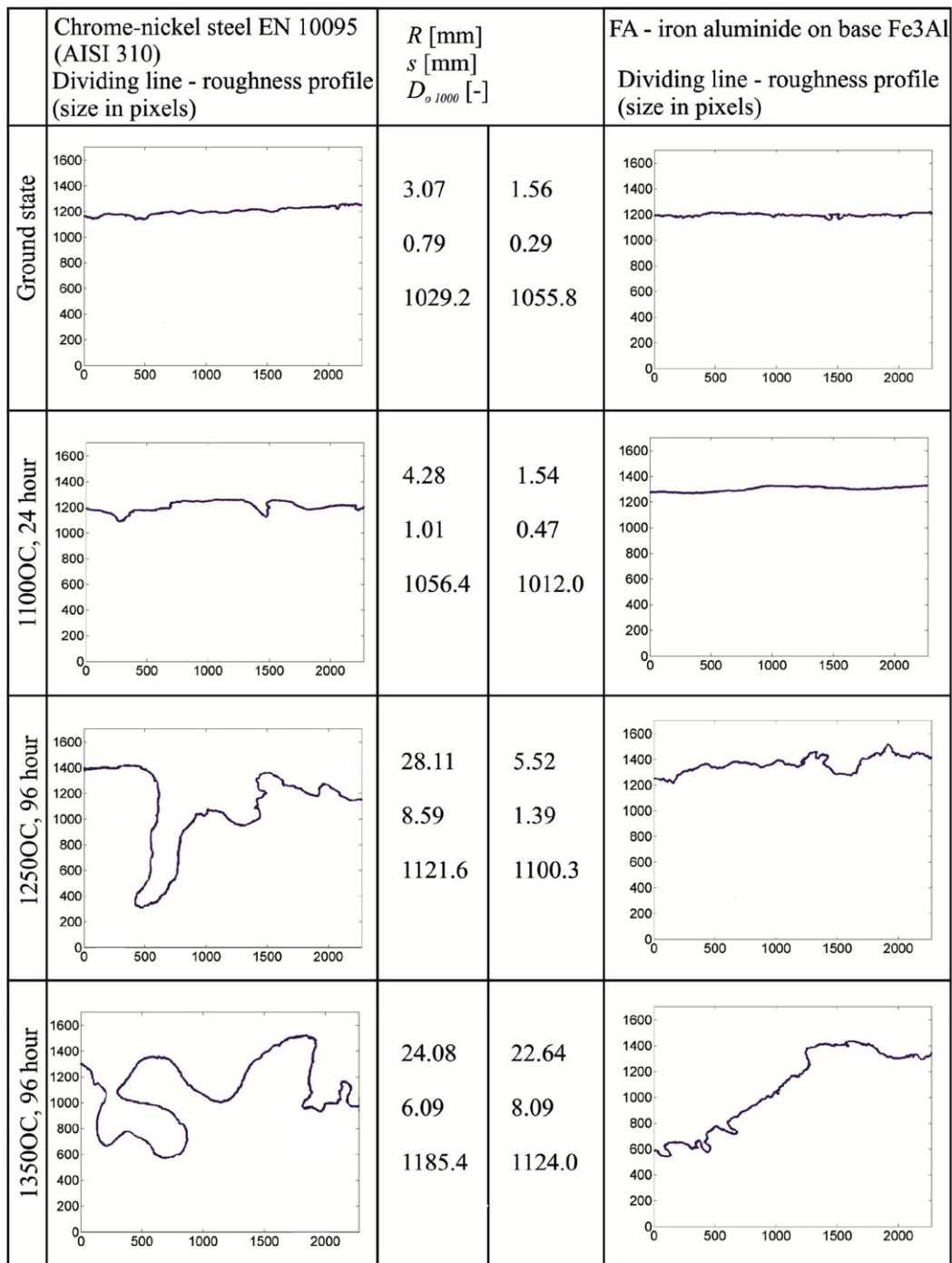


Fig. 6. Examples of dividing lines chrome-nickel steel material and iron aluminide, after static molten glass effects in different temperatures and results of analyses (compass dimension multiplied by 1000, $D_{c\ 1000}$).

The tests have proved that one parameter only cannot describe all types of corrugation. To assess the quality of flat glass, the following three parameters of the curves generated from the reflected image are important: first the complexity (smoothness) of the separated curves from the contours (using the FD), second the range of waviness from an ideal line (using range) and third the rate of deformation (using the length of the curves). All parameters are measured in pixels. The above mentioned measurements were chosen after an extensive analysis and they achieved the best conformity between a subjective evaluation carried out by an experienced operator and the evaluated quality using computed parameters.

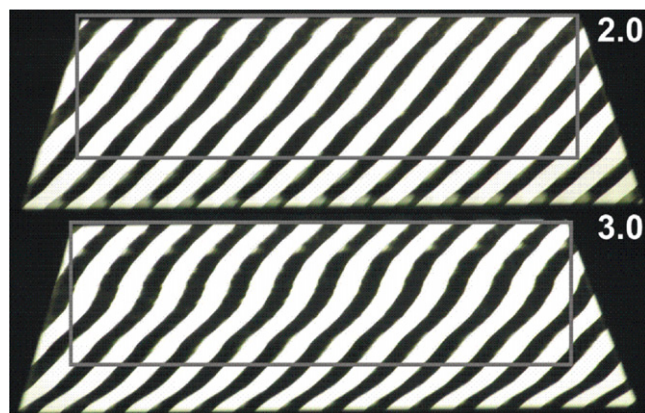


Fig. 7. Good and poor quality of glass sheets with a specification of measured parts.

The system has been successfully tested for two years on the production line with the accuracy of 0.1–0.3 (in the used scale 1.5 to 3.5) in the last version and the system has been enhanced with new features. During this test, the same image format and methodology has been used. The results of over a thousand measurements from a real production process show good potential for the application of this methodology on-line [16]. The on-line corrugation test was implemented in 2011 and showed good stability of the evaluation methodology. Automatic measurement every 1 min is one of many advantages. The system has been tested in a trial run since the end of 2012.

6. Conclusion

The FD is widely used in science, but industrial applications are rather rare. Data analysis using the FD has great potential in combination with statistical and other measurements in industry. This methodology has been used in our research for monitoring three basic data format types: digitalized photos (e.g. digital, classical photographs, images from electron microscopes), time series (e.g. analyses for monitoring and control systems) and topological, one-dimensional dividing lines (e.g. profiles, roughness and the dividing line of light and shade). Modified methods using common findings of fractal geometry are applied to each data type.

The examples of used methods show possibilities of application in practical use in industry and production laboratories. Structured surface, complex time series, difficulty to describe dividing lines are much more common than it can be expected. The FD is then important for an objective quantification of complexity, and should be used as an additional tool for the overall analysis. The results also show that the FD does not substitute tools used for other standard.

Despite the text focusing on data from the glass industry, emphasis was put on the possibilities of using the obtained knowledge, methodology and principles for product and industrial data evaluation more widely in industry generally.

Acknowledgment

This work was supported by the OP Research and Development for Innovation: Centre for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovation, CZ.1.05/2.1.00/01.0005.

References

- [1] B.B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Co, USA, 1982.
- [2] H.O. Peitgen, H. Juergens, D. Saupe, *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*, 2nd ed., Springer-Verlag, USA, 2004.
- [3] C.J.G. Evertsz, H.O. Peitgen, R.F. Voss (Eds.), *Fractal Geometry and Analysis: The Mandelbrot Festschrift*, Curacao 1995, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Singapore, 1996.
- [4] V.J. Levy, E. Lutton, C. Tricot (Eds.), *Fractals in Engineering*, Springer-Verlag, USA, 1997.
- [5] V.J. Levy, E. Lutton (Eds.), *Fractals in Engineering: New Trends in Theory and Applications*, Springer, Germany, 2010.
- [6] V. Hotař, *Methodology of Industrial Data Description Using Fractal Geometry*, Technical University of Liberec, Czech Republic, 2008 (in Czech).
- [7] D. Philpott, H.D. Barnard, P. Bullen, Some fractal measures used with the Noviscam Project, in: *Proceedings: ISQVPFD'2000*, Ljubljana, Slovenia, 2000, pp. 61–70.
- [8] V. Hotař, F. Novotný, Some advanced analyse for quality monitoring, in: *Proceedings: 21st International Congress on Glass*, Strasbourg, France, 2007, p. 91.
- [9] O. Zmeska, M. Nežadal, M. Buchniecek, O. Sedlak, HarFA and HarFA: e-journal, 2002 (online 20 Jan. 2013). Available at: <http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci>.
- [10] V. Hotař, F. Novotný, Evaluation of surface defects by fractal geometry and statistical analysis, *Glass. Sci. Technol.* 77 C (2004) 230–237.
- [11] A. Hotař, P. Kratochvíl, The corrosion resistance of iron aluminide $\text{Fe}_{28}\text{Al}_3\text{Cr}_{0.02}\text{Ce}$ (at%) in molten glass, *Intermetallics* 15 (3) (2007) 439–441.
- [12] V. Hotař, F. Novotný, Surface profile evaluation by fractal dimension and statistical tools, in: *Proceedings: 11th International Conference on Fracture*, Turin, Italy, 2005, p. 588.

- [13] A. Hotař, P. Kratochvíl, V. Hotař, The Corrosion Resistance of Fe_3Al Based Iron Aluminides in Molten Glasses, *Kov. Materiály—Met. Mater.* 47 (4) (2009) 247–252.
- [14] M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle, *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, 3rd ed., CL Engineering, USA, 2007.
- [15] M. Seul, L. O’gorman, M.J. Sammon, *Practical Algorithms for Image Analysis: Description, Examples, and Code*, Cambridge University Press, USA, 2005.
- [16] V. Hotař, F. Novotný, H. Reinischová, Objective evaluation of corrugation test, *Glass Technol.: Eur. J. Glass Sci. Technol. Part A* 52 (6) (2011) 197–202.

Research Article

Surface Evaluation by Estimation of Fractal Dimension and Statistical Tools

Vlastimil Hotar¹ and Petr Salac²

¹ Department of Glass Producing Machines and Robotics, Technical University of Liberec, Studentská 1402/2, 461 17 Liberec, Czech Republic

² Department of Mathematics and Didactics of Mathematics, Technical University of Liberec, Studentská 1402/2, 461 17 Liberec, Czech Republic

Correspondence should be addressed to Vlastimil Hotar; vlastimil.hotar@tul.cz

Received 23 May 2014; Revised 4 July 2014; Accepted 17 July 2014; Published 27 August 2014

Academic Editor: M. Chadli

Copyright © 2014 V. Hotar and P. Salac. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Structured and complex data can be found in many applications in research and development, and also in industrial practice. We developed a methodology for describing the structured data complexity and applied it in development and industrial practice. The methodology uses fractal dimension together with statistical tools and with software modification is able to analyse data in a form of sequence (signals, surface roughness), 2D images, and dividing lines. The methodology had not been tested for a relatively large collection of data. For this reason, samples with structured surfaces produced with different technologies and properties were measured and evaluated with many types of parameters. The paper intends to analyse data measured by a surface roughness tester. The methodology shown compares standard and nonstandard parameters, searches the optimal parameters for a complete analysis, and specifies the sensitivity to directionality of samples for these types of surfaces. The text presents application of fractal geometry (fractal dimension) for complex surface analysis in combination with standard roughness parameters (statistical tool).

1. Introduction

Due to continuously increasing pressure from competitors to improve the quality of products, there is a demand for objective measurement and control methods for materials, processes, and production processes. However, it is almost impossible to describe many structures using conventional methods (e.g., defects, surfaces, cracks, and time series from dynamic processes) because they are complex and irregular. One approach is the application of fractal dimension which is successfully used in science.

The fractal dimension is closely connected to fractals that were defined by Mandelbrot [1], though scientists found some geometric problems with specific objects (e.g., the measurement of coast lines using different lengths of rulers by Richardson). A potentially powerful property of the fractal dimension is the ability to describe complexity by using a single number that defines and quantifies structures [2, 3]. The number is mostly a noninteger value and the fractal dimension is higher than the topological dimension. For

example, the Koch curve (one of the most famous mathematical deterministic fractals) has the topological dimension $D_T = 1$, but the fractal dimension $D_F = 1.2619$. A smooth curve as a line has the topological dimension $D_T = 1$ and the fractal dimension $D_F = 1$. The fractal dimension can be computed for a set of points, curves, surfaces, topological 3D objects, and so forth and if the fractal dimension is higher than the topological dimension, we name the objects fractals.

Fractal dimension is part of a wider theory, fractal geometry. Fractal geometry is closely connected to chaos theory. Furthermore, the obtained structures were produced by real dynamic systems and the obtained data was influenced by these dynamic systems [2, 4, 5]. The data can also be tested to chaotic properties (future work) and also simulated. Chaotic system can be identified by standard tools like Lyapunov coefficient, Hurst coefficient, and also fractal dimension. An alternative and promising way to identify chaotic system is evolutionary reconstruction [6]. Application of chaotic system reconstruction can be practically used for a chaotic cryptosystem procedure [7].

TABLE 1: List of analysed samples with their production properties.

Sample	Technology of surfaces production
1	Polished surface to maximum gloss
2	Ballotini (glass beads) blasting, grain size F120 (mean diameter 0.109 mm)
3	Corundum blasting, grain size F36 (mean diameter 0.525 mm)
4	Corundum blasting, grain size F12 (mean diameter 1.765 mm)
5	Electro-erosion machining 29A
6	Electro-erosion machining 42A
7	Electro-erosion machining 54A
8	Sandpaper, K400
9	Emery cloth, 120
10	Emery cloth, 80
11	Vertical milling machine, milling cutter 20 mm, 120 rpm, feed 30 mm/min
12	Grinding wheel, 98A 60J 9V C40
13	Grinding wheel, 96A 36P 5V
14	Vertical milling machine, milling cutter 20 mm, 120 rpm, feed 240 mm/min

Even though applications of fractal dimension in industry are quite rare and experimental [8], it is possible to find a promising test and applications [9–14]. Fractal dimension in conjunction with statistics can be used as a useful and powerful tool for an explicit, objective, and automatic description of production process data (laboratory, off-line, and potentially on-line). Fractal dimension does not substitute other tools like statistics and should be used with other parameters for complete analysis. Here, we carry out research into the mentioned tools on a methodology that uses standard and nonstandard parameters to evaluate complex data from industrial practice [15, 16] and laboratories [17–19]. The methodology finds suitable parameters for a complete analysis of the data from a set of parameters. Only the chosen parameters should be used in order to reduce processing time in industrial practice. The chosen parameters can also be recalculated to one number and the number can be used in quality assessment, for example, [16].

However, no research based on a deeper analysis of a relatively large data set has been conducted yet. For reliable usage of the methodology and analysis used, their properties and limitations have to be defined. We also wanted to analyse one source of data with different measured methods. The given theoretical results will be used for improvement of the methodology and finding relationships among the parameters and results of various tests. The main motivation is to answer whether parameters like fractal dimension are useful and beneficial for a complex description of the data from industrial practice.

For this purpose we analysed 14 surfaces produced by 5 different processes and in different conditions, Table 1. Figure 1 shows 28 samples (with 14 surfaces). The analysed structures were chosen so as to be different and to cover

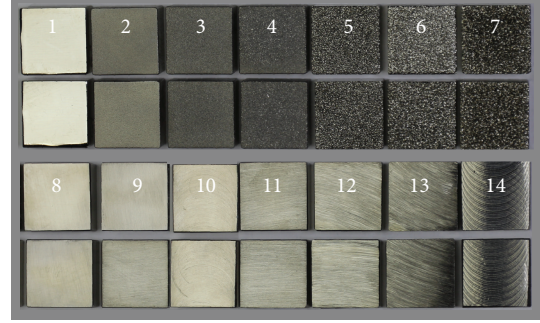


FIGURE 1: Analysed samples with machined surfaces.

the most common surfaces in industrial practice. The chosen samples were made purposely from identical material. This allows us to subsequently ignore material properties and to analyse the change of technological parameters and the influence of technology used.

The samples were measured using 3 methods: with a surface roughness tester, by image-capturing with an electron microscope, and by image-capturing of metallographic samples using an optical microscope, Figure 2. These three methods generate three data types that are the most common types in industrial practice (sequences, signals, 2D images, and dividing lines). The measurements were analysed using the developed methodology with 30 parameters. Results comparison of a surface roughness description, 2D images, and dividing lines seem to be interesting topics for future work.

This paper presents the first results of conducted research and it focuses on data from a surface roughness tester. Nine parameters were chosen for detailed analysis. Further measurements and comparison of the measurements will be published later.

The aims of this phase of the presented research are

- (i) to compare standard and nonstandard parameters;
- (ii) to find the optimal parameters for a complete analysis;
- (iii) to specify the sensitivity to directionality of samples for these types of surfaces.

2. Methodology and Tools Used

The unfiltered reading (raw data) from a surface roughness tester is called a profile (curve). The profile can be evaluated using various methods. The parameters obtained can be divided into three groups, as follows:

- (i) *parameters of amplitude*, useful for depth characterization (Std: standard deviation, R_a : average roughness, R_t : maximum roughness, R_z : mean roughness depth, etc.);
- (ii) *parameters of frequency*, used to describe surface profile spacing parameters and for corrugation frequency characterization (e.g., S_m : mean spacing);

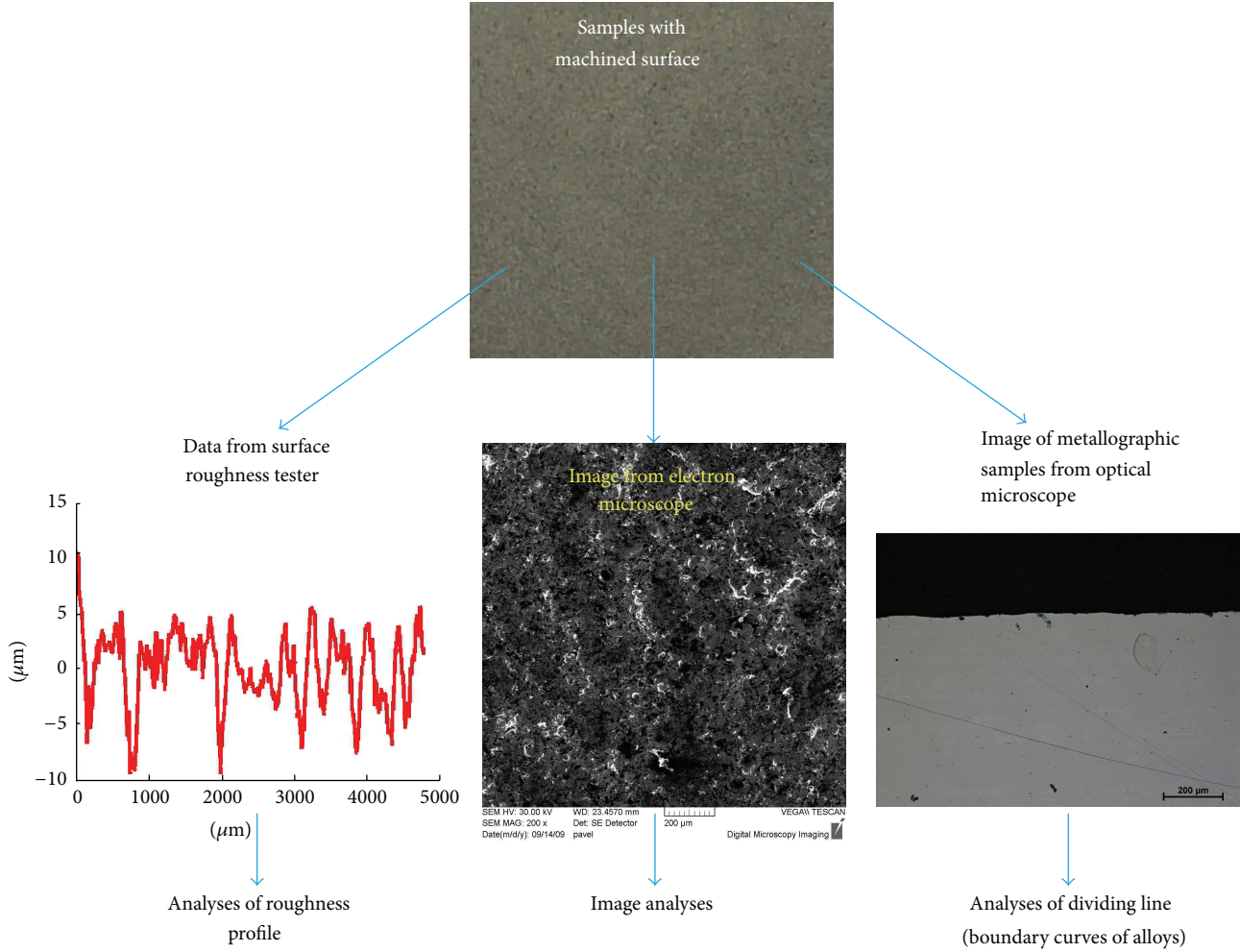


FIGURE 2: Measurement of samples, obtained data, and analyses.

- (iii) *parameters of complexity and deformation*, estimation of fractal dimension by compass dimension (DC) [1–3], by EEE method [20], or by relative length (L_R) and proportional length (L_P) of the profile.

The mentioned parameters of amplitude and frequency are commonly used in industrial practice. These parameters are based on statistics. Average roughness, maximum roughness, mean roughness depth, and mean spacing are surface profile parameters defined by standard ISO 4287-1997 [21]. The parameters of complexity and deformation were selected based on previous experiences.

Average roughness (R_a) is also known as the arithmetical mean roughness. The Average roughness is the area between the roughness profile and its mean line or the integral of the absolute value of the roughness profile height over the evaluation length:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx, \quad (1)$$

where l is the evaluation length and z is the deviation from the center line m , Figure 3. When evaluated from digital data,

the integral is normally approximated by a trapezoidal rule, as follows:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i|, \quad (2)$$

where n is the number of measurements. Graphically, the average roughness is the area (yellow in Figure 3) between the roughness profile and its centre line m divided by the evaluation length. In this field of research, a filtered profile is not being used. For this reason the average roughness is called P_a .

Maximum roughness (R_t), also maximum height, or total roughness, is the vertical distance from the deepest trough to the highest peak, Figure 3. For the unfiltered profile, maximum roughness is denoted by P_t .

Mean roughness depth (R_{z5}) is the arithmetic mean of the single distance from the deepest trough to the highest peak from 5 sampling lengths (l_1 – l_5), Figure 3. For the unfiltered profile, mean roughness depth is denoted by P_{z5} .

S_m is the mean spacing between peaks, now with a peak defined relative to the mean line. A peak must cross above the mean line and then cross back below it. If the width of each

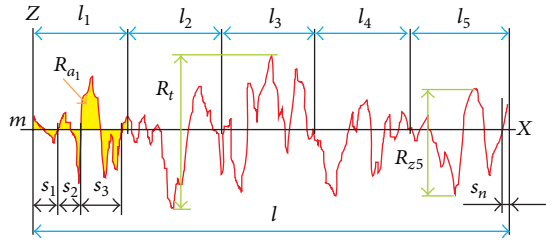


FIGURE 3: Parameters R_a , R_t , R_{z5} , S_m with the centre line m .

peak is denoted as S_i , then the mean spacing is the average width of a peak over the evaluation length, Figure 3:

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i. \quad (3)$$

The estimated compass dimension expresses the degree of complexity of the profile by means of a single number [1]. A compass method [1–3] is based on measuring the profile (curve) using different ruler sizes (Figure 4(a)) according to

$$L_i(r_i) = N_i(r_i) \cdot r_i, \quad (4)$$

where L_i is the length in i -step of the measurement, r_i is the ruler size, and N_i is the number of steps needed for the measurement. If the profile is fractal, and hence the estimated fractal dimension is larger than the topological dimension, then the length measured increases as the ruler size is reduced. The logarithmic dependence between $\log_2 N(r_i)$ and $\log_2 r_i$ is called the Richardson-Mandelbrot plot (Figure 4(b)). The compass dimension is then determined from the slope s of the regression line, as follows:

$$D_C = 1 - s = 1 - \frac{\Delta \log_2 L(r)}{\Delta \log_2 r}. \quad (5)$$

For better comparison of the results, the dimension is multiplied by 1000 (D_{C1000}). The fractal dimension can also be estimated using a different method [2, 3].

The rate of profile deformation can be evaluated from its relative length L_R . This fast and reliable method measures the ratio of the profile length l_{PIXEL} (red curve in Figure 3) using the smallest ruler (1 pixel) r_{PIXEL} and the length of the projection l (Figure 3), as follows:

$$L_R = \frac{l_{\text{PIXEL}}}{l}. \quad (6)$$

Another similar approach is to compute the proportional length of the profile L_P . The proportional length is the ratio of the profile length measured with a defined ruler l_r (e.g., green line in Figure 4(a)) and the length measured with the maximum ruler $l_{r \max}$ (the length between the first and the last point of the profile):

$$L_P = \frac{l_r}{l_{r \max}}. \quad (7)$$

The EEE method (evaluation of length changes with elimination of insignificant extremes) [20] stems from an estimation of the fractal dimension, so it measures changes of lengths in sequential steps. The method does not use a fixed “ruler” for its measurement in every step, but the line is defined by local extremes (maxima and minima). The method is based on the length evaluation of a profile (curve or signal).

The profile is defined by measured values, which are isolated points x_1, x_2, \dots, x_n in the range $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$. The points represent local extremes (maxima and minima). On the profile, unnecessary extremes are classified with a defined ruler and a new simplified function is defined by the remaining points. A relative length L_{R1} of the new function is measured and the result is saved.

The procedure for the elimination of insignificant extremes is applied to the simplified function (profile). The function obtained is also measured and the process is reiterated. The last function is formed from the global maximum and minimum of all functions, at which point the analysis is stopped. The steps i of the analysis are plotted against the computed relative lengths L_{Ri} of the functions. The relation between the relative lengths L_{Ri} and the steps of elimination i is evaluated by a suitable regression function that can be a regression line, a quadratic function, or a hyperbolic function. In the case of using a regression line, the dimension can be computed from the slope s by the following equation:

$$D_{\text{EEE}} = 1 + |s|. \quad (8)$$

For better comparison of the results the dimension is multiplied by 1000 ($D_{\text{EEE}1000}$). More information can be found in [20].

3. Measurement of Samples

The surface roughness tester Mitutoyo SV 2000 was used for taking measurements (parameters: traverse range: 50 mm; linearity of traverse: $0.3 \mu\text{m}/50 \text{ mm}$; stylus speed measuring: 0.5 mm/s ; positioning: 2 mm/s). A standard type of stylus with a 60° angle was used with a measuring force: 0.75 mN .

All samples (2 samples with the same surface) were measured in 9 positions, each position in 3 directions, x , y , and transverse. The length of measurement is $4800 \mu\text{m}$ and the sampling interval is $0.5 \mu\text{m}$. All data obtained is in the form of unfiltered profiles. A software tool for a data evaluation was developed in Matlab.

4. Results

The samples analysed have clearly different structural characters. In Figure 1, the samples are ordered from the smoothest to the most structured surface (from left to right). The two upper lines represent blasted and electroeroded surfaces (random surfaces) and the two bottom lines represent the classically machined surfaces. Graphs in Figures 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, and 13 show the results of analysis for the surfaces from the measurement of the profiles in one direction (x -axis). A correlation between the chosen parameters is

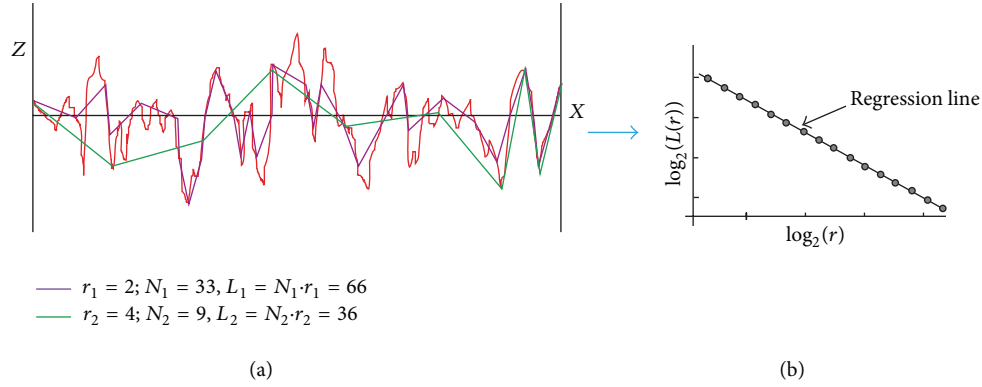


FIGURE 4: Estimation of the fractal dimension by the compass method.

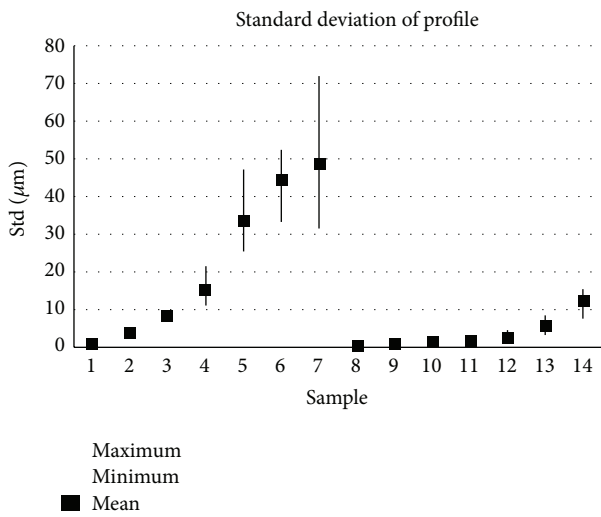
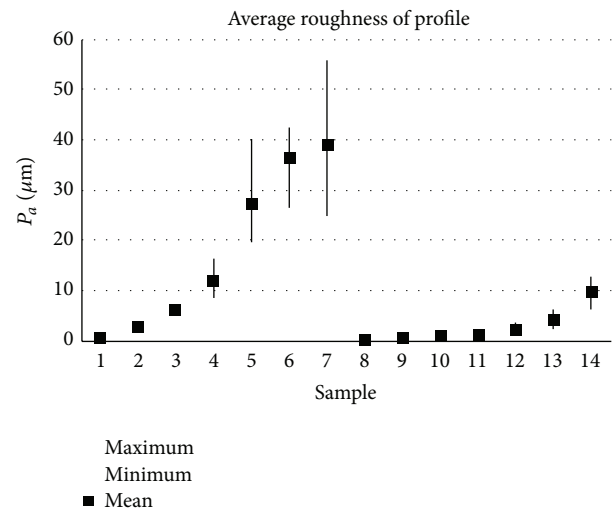


FIGURE 5: Results of parameter Standard deviation (x-axis).

FIGURE 6: Results of P_a parameter (x-axis).

clearly visible (P_a , $D_{EEE1000}$, and L_R). The D_{C1000} parameter correlates lower and the S_m parameter does not correlate. To evaluate the parameters objectively, Pearson's correlation coefficients were computed, see Table 2 (the parameters are normally distributed). The aim is to specify the appropriate parameters for fast and reliable analysis for industrial data evaluation [15] (e.g., production control or quality monitoring). Only the chosen parameters should be used for a complete analysis of the data in order to reduce processing time. Some parameters linearly correlate with others (they provide similar information about the data), Table 2. If the situation is simplified and a linear correlation is assumed, we can specify suitable parameters for evaluation of these types of data as follows: average roughness, P_a (parameter of amplitude), Mean Spacing, S_m (parameter of frequency), compass dimension, and D_{C1000} (parameter of complexity and deformation). These 3 parameters provide diverse information about the data.

A decisive number (a testing number, a quality number) is required in several applications. Typically, during a subjective testing by an operator (mostly by human eyes), one tested number is obtained, based on subjective comparison with

etalons [15, 16]. The demand for only one testing number for quality evaluation comes from industrial practice. Three parameters that fully describe the data can be used for objective evaluation. In these cases the single number has to be calculated from the 3 parameters by weight coefficients and can be converted to a specified quality scale. The weight coefficients for each of the three parameters have to be specified using an appropriate methodology.

Measurements were taken at 9 different measurement points in the x , y , and transverse direction for each of the 28 samples examined. This was done for all 9 presented methods.

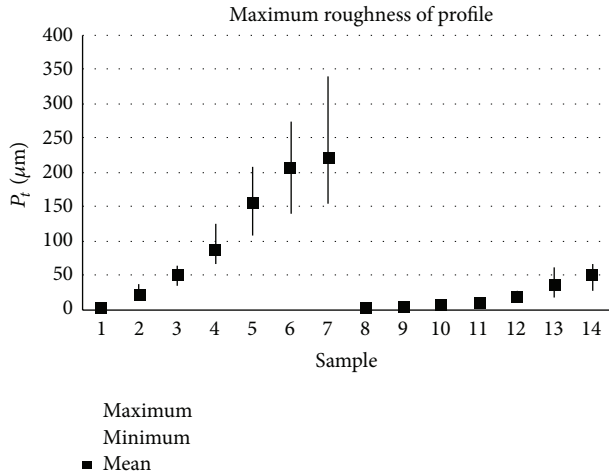
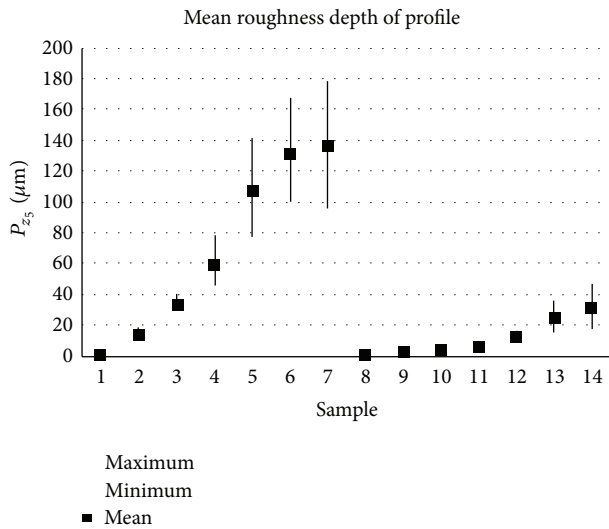
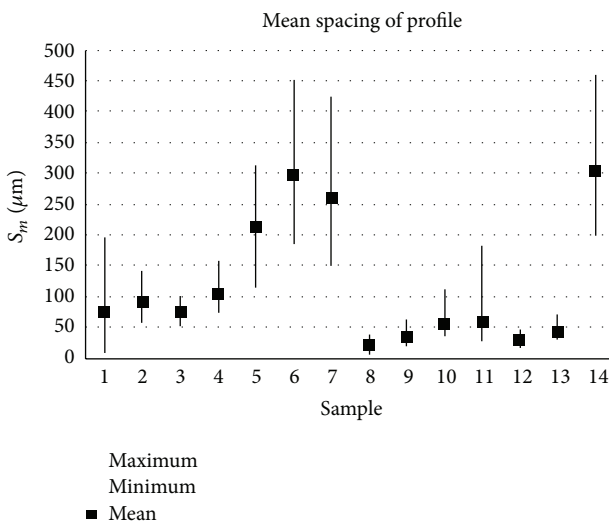
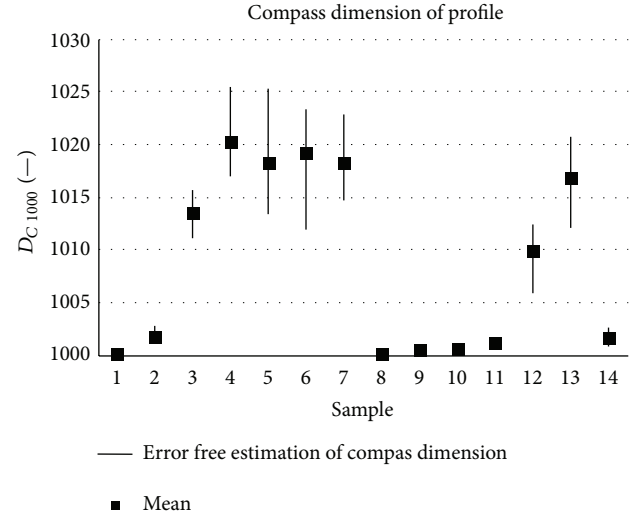
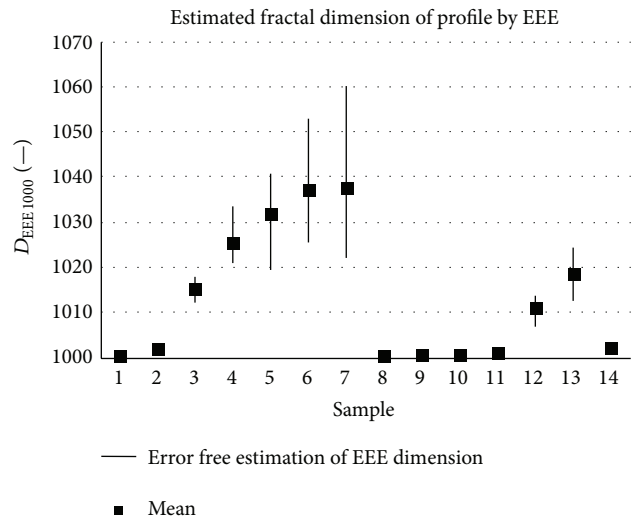
The mean values of the data obtained from individual samples of x -axis directions (μ_1), y -axis directions (μ_2), and the transverse directions (μ_3) were compared for each sample. Conformity of the mean values was tested by one-way analysis of variance (ANOVA) [22] at significance level $\alpha = 0.05$ using Matlab software. Thus,

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_1 &= \mu_2 = \mu_3 \\ H_1 : \text{non } H_0. \end{aligned} \quad (9)$$

TABLE 2: Correlation coefficients of parameters (x-axis).

	L_P proportional length, [—]	L_R relative length, [—]	$D_{EEE\ 1000}$ EEE dimension, [—]	D_{C1000} compass dimension, [—]	S_m mean spacing, [μm]	P_{z5} mean roughness depth, [μm]	P_t maximum roughness, [μm]	P_a Average roughness, [μm]	Std standard deviation, [μm]
Standard deviation, Std [μm]	0.92	0.92	0.90	0.74	0.37	0.98	0.99	1.00*	1.00
Average roughness, P_a [μm]	0.92	0.92	0.89	0.74	0.37	0.98	0.98	1.00	
Maximum roughness, P_t [μm]	0.93	0.93	0.92	0.79	0.34	0.99	1.00		
Mean roughness Depth, P_{z5} [μm]	0.95	0.95	0.94	0.81	0.33	1.00			
Mean spacing, S_m [μm]	0.25	0.25	0.22	0.15	1.00				
Compass dimension, D_{C1000} [—]	0.85	0.85	0.94	1.00					
EEE dimension $D_{EEE\ 1000}$ [—]	0.96	0.96	1.00						
Relative length, L_R [—]	1.00*	1.00							
Proportional length, L_P [—]	1.00								

*The correlation coefficient is rounded up to 1.00, but is not equal to 1.

FIGURE 7: Results of P_t parameter (x-axis).FIGURE 8: Results of P_{z5} parameter (x-axis).FIGURE 9: Results of S_m parameter (x-axis).FIGURE 10: Results of fractal dimension estimation, D_{C1000} (x-axis).FIGURE 11: Results of fractal dimension estimation, $D_{EEE1000}$ (x-axis).

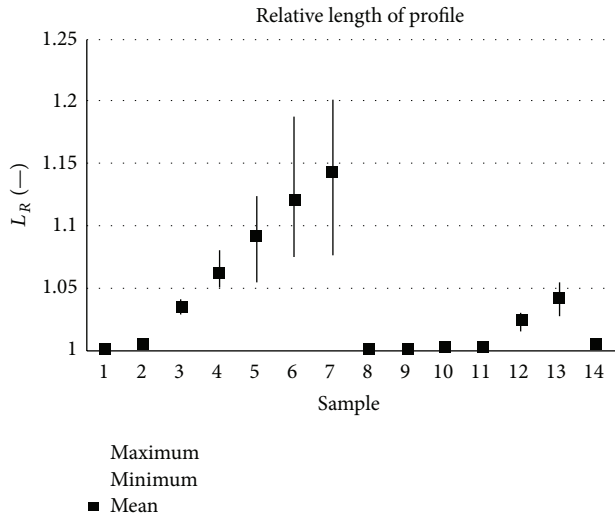
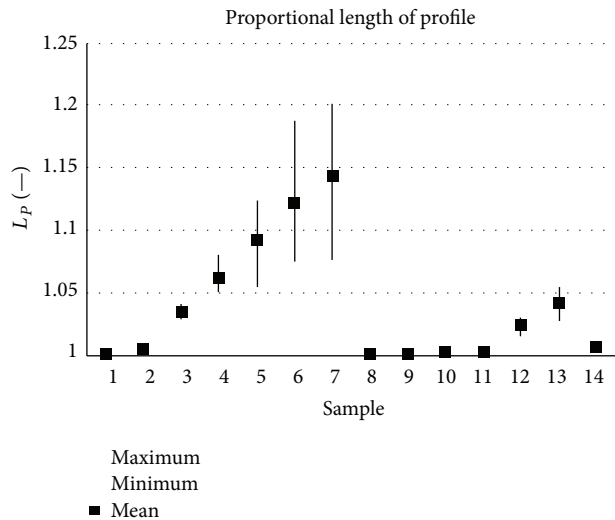
The test results are shown in Table 3, where value 0 means a rejection H_0 and a benefit H_1 (results of measurement are dependent according to direction). Value 1 does not constitute rejection H_0 (results are independent on the direction). P values for rejection of the hypothesis H_0 in favor of the alternatives H_1 are also shown in Table 3.

Samples 1 to 7 were prepared by technologies that produce random structures. Samples 8 to 14 were produced by a standard machining method that generates directionally visible structures (Figure 1). Samples 8, 9, 10, 12, and 13 have linearly oriented structures. Samples 11 and 14 have rotationally oriented structures, because of the milling technology. Parameters D_{C1000} , $D_{EEE1000}$, L_R , and L_P (parameters of complexity and deformation) show good results in recognition of the directionality. The only exception was for samples 11. These samples have a smooth rotationally

TABLE 3: One-way analysis of variance (ANOVA).

	Standard deviation,		Average roughness,		Maximum roughness,		Mean roughness depth,		Mean spacing,		Compass dimension,		EEE dimension,		Relative length,		Proportional length,	
	H_0 (0.95)*	P value**	P_a [mm]	H_0 (0.95)*	P value**	P_t [mm]	H_0 (0.95)*	P value**	S_m [mm]	H_0 (0.95)*	P value**	D_{C1000} [—]	H_0 (0.95)*	P value**	$D_{EEE1000}$ [—]	H_0 (0.95)*	P value**	L_P [—]
1A	1	0.726	1	0.766	1	0.533	1	0.615	1	0.517	1	0.839	1	0.805	1	0.819	1	0.819
1B	1	0.529	1	0.482	1	0.408	1	0.425	1	0.781	1	0.286	1	0.287	1	0.287	1	0.287
2A	1	0.930	1	0.808	1	0.821	1	0.628	1	0.723	1	0.299	1	0.071	1	0.282	1	0.282
2B	1	0.903	1	0.920	1	0.273	1	0.449	1	0.500	1	0.807	1	0.775	1	0.967	1	0.967
3A	1	0.849	1	0.908	1	0.448	1	0.842	1	0.545	1	0.596	1	0.494	1	0.494	1	0.494
3B	1	0.562	1	0.873	0	0.006	1	0.382	1	0.434	1	0.930	1	0.770	1	0.950	1	0.950
4A	1	0.861	1	0.897	1	0.979	1	0.567	1	0.866	1	0.804	1	0.853	1	0.945	1	0.945
4B	1	0.990	1	0.998	1	0.924	1	0.824	1	0.455	1	0.850	1	0.958	1	0.933	1	0.933
5A	1	0.336	1	0.326	1	0.773	1	0.795	0	0.033	0	0.032	1	0.167	1	0.625	1	0.626
5B	1	0.102	1	0.227	0	0.035	1	0.135	1	0.484	1	0.945	1	0.767	1	0.699	1	0.700
6A	0	0.049	1	0.070	1	0.260	1	0.347	1	0.414	1	0.847	1	0.296	1	0.728	1	0.728
6B	1	0.798	1	0.926	1	0.889	1	0.903	1	0.294	1	0.439	1	0.984	1	0.710	1	0.710
7A	1	0.951	1	0.808	1	0.983	1	0.326	1	0.399	1	0.415	1	0.753	1	0.635	1	0.635
7B	1	0.502	1	0.484	1	0.345	1	0.580	1	0.392	1	0.562	1	0.214	1	0.503	1	0.506
8A	1	0.566	1	0.669	1	0.596	1	0.250	0	0.048	0	0.007	0	0.003	0	0.003	0	0.003
8B	1	0.085	1	0.289	0	0.037	1	0.336	1	0.299	0	0.005	0	0.000	0	0.001	0	0.001
9A	1	0.074	1	0.091	1	0.538	1	0.372	0	0.001	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
9B	0	0.000	0	0.000	1	0.707	1	0.156	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
10A	1	0.541	1	0.567	0	0.001	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
10B	1	0.442	1	0.626	0	0.001	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
11A	1	0.192	1	0.188	1	0.620	1	0.908	0	0.004	1	0.062	1	0.141	1	0.072	1	0.072
11B	1	0.454	1	0.241	1	0.998	1	0.895	1	0.151	1	0.220	1	0.153	1	0.210	1	0.210
12A	0	0.001	0	0.002	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
12B	1	0.272	1	0.671	1	0.993	1	0.207	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
13A	1	0.988	1	0.978	1	0.892	1	0.106	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
13B	1	0.926	1	0.959	1	0.282	1	0.171	0	0.005	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
14A	1	0.706	1	0.785	1	0.666	1	0.128	1	0.110	0	0.010	0	0.010	0	0.012	0	0.012
14B	1	0.200	1	0.167	1	0.225	1	0.169	1	0.534	0	0.025	0	0.038	0	0.038	0	0.038

* Null hypothesis H_0 : value 1 means results are independent of direction; value 0 means results are dependent on direction.
 ** P values for one-way analysis of variance (ANOVA) for the test (9).

FIGURE 12: Results of relative length measurement, L_R (x-axis).FIGURE 13: Results of proportional length measurement, L_P (x-axis).

oriented structure that is identified as a random structure. The results show that the mentioned parameters are useful for finding directionally dependent and independent structures. However, the conclusion is valid only for the analysed data and must be verified in further research.

5. Conclusions

The methodology for evaluation of complex and irregular data was developed and applied in industrial practice. The fractal dimension is used in combination with statistical tools; thus commonly used parameters and relatively new parameters are used simultaneously. This methodology searches appropriated parameters for a complex evaluation of data. Only the chosen parameters are used for a complete analysis of the data in order to reduce processing time.

We conducted this research to verify and find properties of the methodology on data measured from 14 samples. The samples were produced by 5 different technologies (commonly used in industry) under different production properties. The samples were measured using 3 methods: by a surface roughness tester, by an electron microscope, and by an optical microscope.

In the first phase of the research we analysed data sets obtained from a surface roughness tester. The nine used parameters were divided into sets: parameters of amplitude, parameters of frequency, parameters of complexity, and deformation. One parameter in each set was determined using the correlation coefficient to evaluate these data types: average roughness, P_a (parameter of amplitude), Mean Spacing, S_m (parameter of frequency), and compass dimension, D_{C1000} (parameter of complexity and deformation). These 3 parameters provide diverse information about the data and can be used for a complete data analysis. Within the framework of the research, sensitivity to sample directionality for these types of surfaces was determined. Parameters of complexity and deformation: compass dimension (D_{C1000}), EEE dimension ($D_{EEE1000}$), relative length (L_R), and proportional length (L_P) can be used for linear structure recognition of the presented data. Based on these results, it can be inferred that the tools represented here are suitable for recognition directionally dependent and independent structures. De facto one-way analysis of variance (ANOVA) illustrates the parameter sensitivity of complexity and deformation to the detection of random structures. Verification of whether the structure is chaotic and also if the structure must be chaotic for detection with the specified procedure will be carried out.

Our future work will focus on two other forms of data: 2D images and dividing lines. Further research will also compare data analyses in various forms (sequences, signals, 2D images, and dividing lines). The potential of the mentioned methodology for industrial practise will be verified. Subsequently, verification of whether the description of complex data is only possible with the use of fractal dimension or sufficient "standard tools" (especially statistical tools) will be executed. Chaotic properties of obtained data will also be studied, because they come from real dynamic systems that can be chaotic.

The fractal dimension is widely used in science, but industrial applications are rather rare. Data analysis using the fractal dimension has great potential in combination with statistical and other measurements in industry. This and previously presented results show possibilities of application in practical use in industry and production laboratories. Structured surface, complex time series, and difficulty describing dividing lines are much more common than can be expected.

Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Acknowledgments

The results of this project LO1201 were obtained through the financial support of the Ministry of Education, Youth and Sports in the framework of the targeted support of the “National Programme for Sustainability I”, the OPR&DI Project Centre for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovation CZ.1.05/2.1.00/01.0005, and the Grant of Students Grant Contest of the Technical University of Liberec, no. SGS 21006/115, which use special-purpose support for the university research and is financed by the Ministry of Education, Czech Republic.

References

- [1] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Co., San Francisco, Calif, USA, 1982.
- [2] H. Peitgen, H. Jürgens, and D. Saupe, *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*, Springer, New York, NY, USA, 1992.
- [3] C. J. G. Evertsz, H. O. Peitgen, and R. F. Voss, *Fractal Geometry and Analysis*, World Scientific Publishing, Singapore, 1996.
- [4] R. C. Hilborn, *Chaos and Nonlinear Dynamics*, 2003.
- [5] D. Gulick, *Encounters with Chaos*, McGraw-Hill, 1992.
- [6] M. Chadli, I. Zelinka, and T. Youssef, “Unknown inputs observer design for fuzzy systems with application to chaotic system reconstruction,” *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 66, no. 2, pp. 147–154, 2013.
- [7] I. Zelinka, M. Chadli, D. Davendra, R. Senkerik, and R. Jasek, “An investigation on evolutionary reconstruction of continuous chaotic systems,” *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 57, no. 1-2, pp. 2–15, 2013.
- [8] V. J. Levy, E. Lutton, and C. Tricot, *Fractals in Engineering*, Springer, New York, NY, USA, 1997.
- [9] A. Conci and C. B. Proenca, “A fractal image analysis system for fabric inspection based on a box-counting method,” *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 30, no. 20-21, pp. 1887–1895, 1998.
- [10] T. Wang, X. G. Liu, and Z. Y. Zhang, “Characterization of chaotic multiscale features on the time series of melt index in industrial propylene polymerization system,” *Journal of the Franklin Institute—Engineering and Applied Mathematics*, vol. 351, pp. 878–906, 2014.
- [11] A. Nurkkala, F. Pettersson, and H. Saxén, “Nonlinear modeling method applied to prediction of hot metal silicon in the iron-making blast furnace,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 50, no. 15, pp. 9236–9248, 2011.
- [12] L. Yu and D. Qi, “Applying multifractal spectrum combined with fractal discrete Brownian motion model to wood defects recognition,” *Wood Science and Technology*, vol. 45, no. 3, pp. 511–519, 2011.
- [13] J. N. Muguthu and D. Gao, “Profile fractal dimension and dimensional accuracy analysis in machining metal matrix composites (MMCs),” *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 28, no. 10, pp. 1102–1109, 2013.
- [14] C. X. Zheng, D. W. Sun, and L. Y. Zheng, “Recent applications of image texture for evaluation of food qualities—a review,” *Trends in Food Science & Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 113–128, 2006.
- [15] V. Hotař, “Fractal geometry for industrial data evaluation,” *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 66, no. 2, pp. 113–121, 2013.
- [16] V. Hotař, F. Novotný, and H. Reinischová, “Objective evaluation of the corrugation test for sheet glass surfaces,” *Glass Technology: European Journal of Glass Science and Technology A*, vol. 52, no. 6, pp. 197–202, 2011.
- [17] V. Hotař and F. Novotný, “Surface profile evaluation by fractal dimension and statistic tools,” in *Proceedings of the 11th International Conference on Fracture*, CCI Centro Congressi Internazionale, Turin, Italy, 2005.
- [18] V. Hotař and F. Novotný, “Evaluation of surface defects by fractal geometry and statistical analysis,” *Glass Science and Technology*, vol. 77, pp. 230–237, 2004.
- [19] A. Hotař, P. Kratochvil, and V. Hotař, “The corrosion resistance of Fe3Al-based iron aluminides in molten glasses,” *Kovove Materialy—Metallic Materials*, vol. 47, pp. 247–252, 2009.
- [20] V. Hotař, “EEE Method: improved approach of compass dimension calculation,” in *Proceedings of the Advances in Intelligent Systems and Computing (Nostradamus '13)*, I. Zelinka, V. Snasel, G. Chen, A. Abraham, and E. Rossler, Eds., vol. 210, pp. 343–351, Ostrava, Czech Republic, 2013.
- [21] ISO 4287, *Geometrical Product Specifications (GPS)—Surface Texture: Profile Method—Terms, Definitions and Surface Texture Parameters*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1997.
- [22] I. Statistics, *Introduction to ANOVA, Regression, and Logistic Regression*, Sas Inst., 2005.

- [12] VESELÁ, K., PEXA, M., MAŘÍK, J. (2014) The effect of biofuels on the quality and purity of engine oil. *Agro-nomy Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 425 – 430, Estonian Agricultural University. Estonia.

Fractal Geometry Used for Evaluation of Corrosion Resistance of Fe-14Al-6Cr Wt. % against Molten Glass

Adam Hotar¹, Vlastimil Hotar²

¹Department of Material Science, Technical University of Liberec, Studentska 2, 461 17 Liberec, Czech Republic, E-mail: adam.hotar@tul.cz

²Department of Glass Producing Machines and Robotics, Technical University of Liberec, Studentska 2, 461 17 Liberec, Czech Republic, E-mail: vlastimil.hotar@tul.cz

Corrosive attack of metals and alloys by molten glass can be described by parameters of surface roughness. Fractal geometry and statistic tools were used for surface roughness quantification. The obtained parameters of fractal geometry and statistics were determined on boundary curves between alloys and glass which had been generated from the digital photography of sample cross-section. This methodology was successfully used for quantification of surface changes of iron aluminides Fe-14Al-6Cr and austenitic steel during corrosion test in molten soda-lime glass at 1200°C.

Keywords: Fractal geometry, corrosion, molten soda-lime glass, iron aluminide, austenitic steel

1 Introduction

The fractal dimension is closely connected to fractals that were defined by Benoit Mandelbrot [1], though scientists found some geometric problems with specific objects (e.g. the measurement of coast lines using different lengths of rulers by Richardson). A potentially powerful property of the fractal dimension is the ability to describe complexity by using a single number that defines and quantifies structures [2, 3]. The number is mostly a non-integer value and the fractal dimension is higher than the topological dimension. For example, the Koch curve (one of the most famous mathematical deterministic fractals) has the topological dimension $D_T = 1$, but the fractal dimension $D_F = 1.2619$. A smooth curve as a line has the topological dimension $D_T = 1$ and the fractal dimension $D_F = 1$. The fractal dimension can be computed or estimated for a set of points, curves, surfaces, topological 3D objects, etc. and if the fractal dimension is higher than the topological dimension, we name the objects fractals.

Fractal dimension is part of a wider theory, fractal geometry. Fractal geometry is closely connected to chaos theory. Furthermore, the obtained structures were produced by real dynamic systems, and the obtained data was influenced by these dynamic systems [2, 4, 5]. The data can also be tested to chaotic properties and also simulated. Chaotic system can be identified by standard tools like Lyapunov coefficient, Hurst coefficient and also by fractal dimension.

Even though applications of fractal dimension in industry are quite rare and experimental [6], it is possible to find a promising test and applications [7, 8, 9, 10]. Fractal dimension in conjunction with statistics can be used as a useful and powerful tool for an explicit, objective and automatic description of production process data (laboratory, off-line and potentially on-line). Fractal dimension does not substitute other tools like statistics and should be used with other parameters for complete analysis. Here, we carry out research into the mentioned tools on a methodology that uses standard and non-standard parameters to evaluate complex data from industrial practice [11, 12] and laboratories [13, 14, 15]. The methodology finds suitable parameters for a complete analysis of the data from a set of parameters. Only the chosen parameters should be used in order to reduce processing time in industrial practice. The chosen parameters can also be recalculated to one number, and the number can be used in quality assessment, for example [12].

The main aim of the article is to show the developed objective methodology for quantification of surface roughness of alloys (with different chemical compositions) after corrosion attack by molten glass. The selected parameters of fractal dimension and statistics tools were used early in [16, 17] for quantification of the corrosion resistance against molten glass. However, these parameters were evaluated only for comparison between the state of sample surface before and after corrosion test. The present paper describes the methodology application for corrosion attack of Fe-14Al-6Cr in molten soda-lime glass depending on time. In additional, the corrosion attack of iron aluminide was compared with austenitic steel because iron aluminides have been studied as candidates for high-temperature structural applications [18, 19]. The methodology was applied to boundary curve between alloy and glass. The surface roughness was measured after 0 to 168 hour exposure to molten glass. The article does not answer a corrosion mechanism of tested samples and structural

changes of sample surfaces in time.

2 Experiment and samples

The chemical compositions of the investigated alloys are summarised in Tab. 1. The samples were cylinders of 18 mm height with a diameter of 12 mm. The surface of samples was carefully polished by using SiC paper grit 1200. The corrosion test was performed at 1200°C in molten soda-lime glass (Tab. 2). Each sample was placed (on the base of cylinder) in an alumina crucible. Then the crucible was filled with glass scrap. The crucible was subsequently heated to 1200°C in a muffle furnace. The corrosion tests were carried out for time intervals: 24, 48, 72, 96 and 168 hours. After each time interval, the crucible was cooled down slowly in the furnace and the crucible was carefully broken. The corrosion resistance of both alloys, including the samples before the test (in raw state, time: 0), was determined and compared using the developed methodology.

The methodology uses statistic tools (like Standard Deviation, Average Roughness, Mean Spacing, etc.), fractal geometry (estimation of fractal dimension), and others tools (like measurement of lengths). The methodology use 22 parameters, however the article shows only some of them.

Tab. 1 Chemical composition of alloys

Alloys		Chemical composition					
		Al	C	Cr	Mn	Ni	Fe
Fe-14Al-6Cr	wt.%	14.20	0.02	5.63	max. 0.45	-	Bal.
	at.%	25.41	0.08	5.23	max. 0.40	-	Bal.
EN X8CrNi25-21	wt.%	-	max. 0.20	24.00 – 26.00	1.50	19.00 – 22.00	Bal.
	at.%	-	max. 0.92	25.37 – 27.48	1.50	17.79 – 20.60	Bal.

Tab. 2 Chemical composition of soda-lime glass

Composition (wt.%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Soda – lime glass (transparent container glass)	74.03	1.67	0.05	10.08	0.54	0.62	12.68	0.13

2.1 Methodology

The cross section of the surface was investigated by using light optical microscopy, see Fig. 1 A. The shape of the surface - dividing line between the alloy and glass (boundary curve) was evaluated (Fig. 1 B) and described by image analysis using a software tool developed in Matlab.

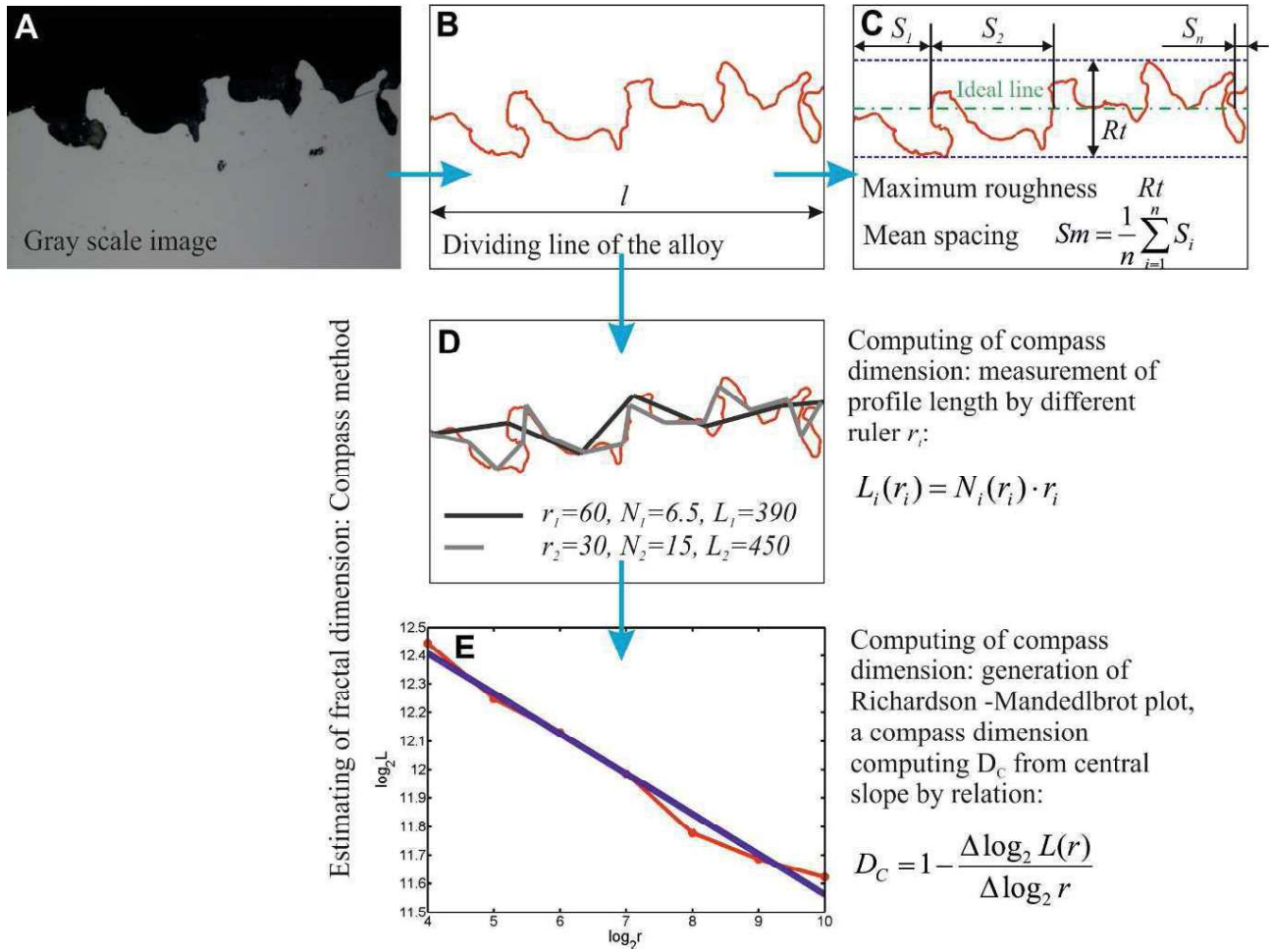


Fig. 1 Image analysis: A - gray scale image from light optical microscopy, B - evaluated dividing line between the alloy and glass (boundary curve), C - parameter of amplitude (R_t – maximum roughness) and parameter of frequency (Sm – mean spacing), D - computing of compass dimension, E - compass dimension D_c computed from slope

The evaluation of roughness parameters was carried out on ten places for each sample (each alloy and time interval). The corrosion attack of the tested alloy may be described also using the roughness of the surface. Many types of parameters can be used for a quantification of the metal roughness. The parameters can be divided into three groups:

- parameters of amplitude, useful for depth characterization (Std - Standard Deviation, R_a - Average Roughness, R_t - Maximum Roughness, etc.).
- parameters of frequency, used to describe surface profile spacing parameters and for corrugation frequency characterization (e.g. Sm - Mean Spacing),
- parameters of complexity and deformation, estimation of fractal dimension by Compass Dimension (D_c) [1, 2, 3], by Relative Length (LR) of the profile.

The mentioned parameters of amplitude and frequency are commonly used in industrial practice. These parameters are based on statistics. Average Roughness, Maximum Roughness, and Mean Spacing are surface profile parameters defined by standard ISO 4287-1997 [20]. The parameters of complexity and deformation were selected based on previous experiences.

Standard deviation Std is a commonly known statistical tool.

Average Roughness (R_a) is also known as the Arithmetical Mean Roughness. The Average Roughness is the area between the roughness profile and its mean line, or the integral of the absolute value of the roughness profile height over the evaluation length:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (1)$$

(where l is the evaluation length, z is the deviation from the centre line m). When evaluated from digital data, the integral is normally approximated by a trapezoidal rule:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (2)$$

(where n is the number of measurements). In this field of research, a filtered profile is not being used. For this reason the Average Roughness is called Pa .

Maximum Roughness (Rt), also Maximum Height, or Total Roughness, is the vertical distance from the deepest trough to the highest peak, Fig. 1 C. For the unfiltered profile, Maximum Roughness is denoted Pt .

Sm is the Mean spacing between peaks, now with a peak defined relative to the mean line. A peak must cross above the mean line and then cross back below it. If the width of each peak is denoted as Si , then the mean spacing is the average width of a peak over the evaluation length, Fig. 1 C:

$$Sm = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (3)$$

The estimated Compass Dimension expresses the degree of profile complexity by means of a single number [1]. A compass method [1, 2, 3] is based on measuring the profile (curve) using different ruler sizes (Fig. 1 D) according to the equation:

$$L_i(r_i) = N_i(r_i) \cdot r_i \quad (4)$$

Where L_i is the length in i -step of the measurement, r_i is the ruler size and N_i is the number of steps needed for the measurement. If the profile is fractal, and hence the estimated fractal dimension is larger than the topological dimension, then the length measured increases as the ruler size is reduced. The logarithmic dependence between $\log_2 N(r_i)$ and $\log_2 r_i$ is called the Richardson-Mandelbrot plot (Fig. 1 E). The Compass Dimension is then determined from the slope s of the regression line:

$$D_C = 1 - s = 1 - \frac{\Delta \log_2 L(r)}{\Delta \log_2 r} \quad (5)$$

For better comparison of the results, the dimension is multiplied by 1000 (D_{C1000}). The fractal dimension can also be estimated using a different method [2, 3].

The rate of profile deformation can be evaluated from its Relative Length L_R . This fast and reliable method measures the ratio of the profile length l_{PIXEL} (red curve in Fig. 1 B) using the smallest ruler (1 pixel) r_{PIXEL} and the length of the projection l (Fig. 1 B)

$$L_R = \frac{l_{PIXEL}}{l} \quad (6)$$

3 Results and discussion

Graphs in Fig. 2 to Fig. 6 show the results of analysis for the dividing line between alloys and glass. Average values were used in order to compare results. The analysis using the developed methodology has two steps.

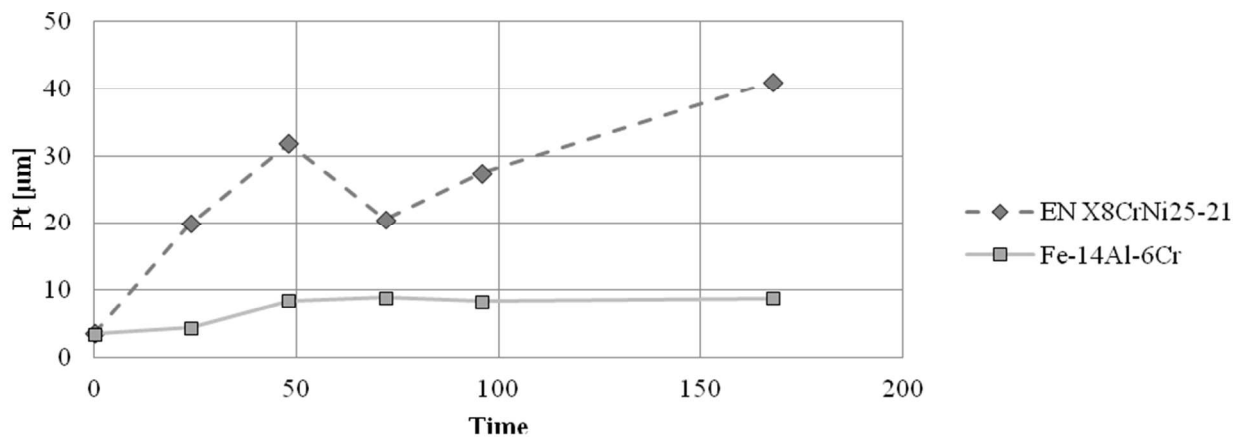


Fig. 2 The average value of Maximum Roughness of profile, Pt as a function of time for corrosion in molten soda-lime glass

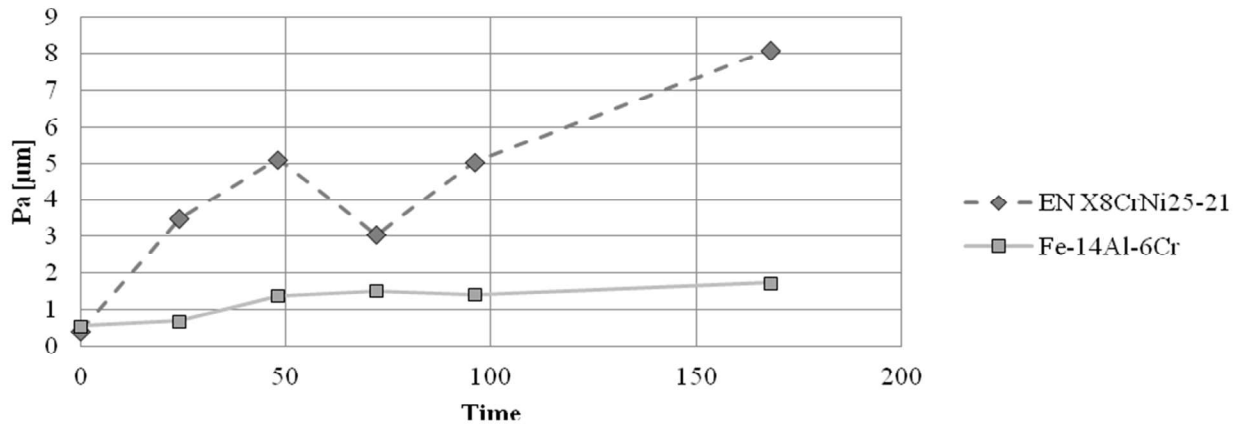


Fig. 3 The average value of Average Roughness of profile, P_a as a function of time for corrosion in molten soda-lime glass

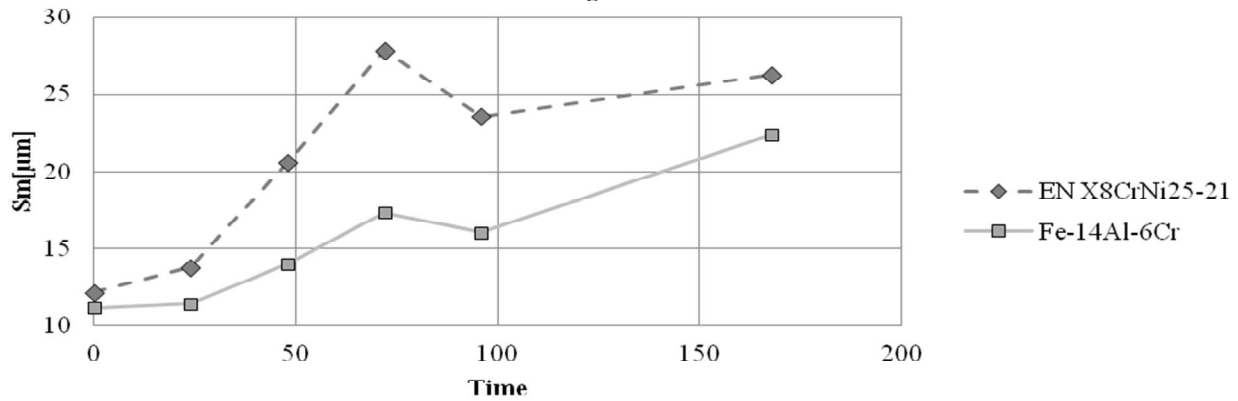


Fig. 4 The average value of Mean Spacing of profile, S_m as a function of time for corrosion in molten soda-lime glass

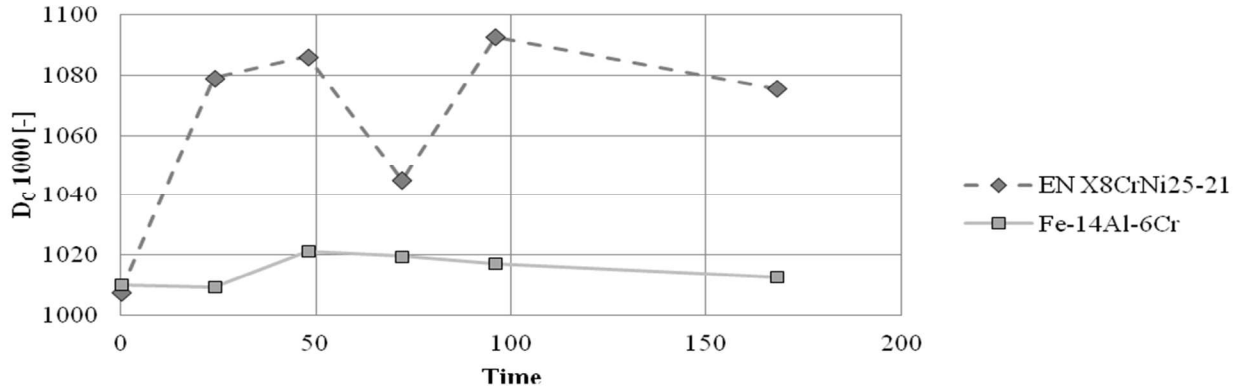


Fig. 5 The average value of fractal dimension estimation, Compass Dimension of profile $DC\ 1000$ as a function of time for corrosion in molten soda-lime glass

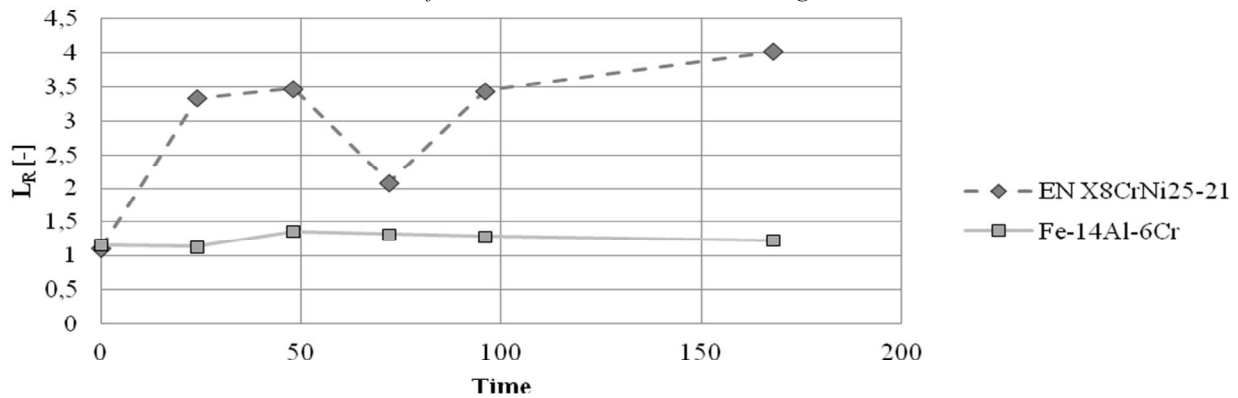


Fig. 6 The average value of Relative Length measurement, L_R as a function of time for corrosion in molten soda-lime glass

The first step is a specification of appropriate parameters for fast and reliable analysis for data evaluation. Mentioned

methodology contains 22 parameters. However, only chosen parameters were used for a complete analysis in order to simplify the analysis and to reduce the processing time.





Some parameters linearly correlate with the others (they provide similar information about the data). To evaluate the parameters objectively, Pearson's correlation coefficients were computed, see Tab. 3. A correlation between the chosen parameters is clearly visible (Pa and Pt). The L_R parameter correlates less with the parameters Pa and Pt , but still significantly. The D_{C1000} parameter correlates less with the parameters Pa and Pt , but correlates with the L_R parameter. The Sm parameter does not correlate. If the situation is simplified and a linear correlation is assumed, we can specify suitable parameters for evaluation of these types of data as: Maximum Roughness, Pt (parameter of amplitude), Mean Spacing, Sm (parameter of frequency), Compass Dimension, D_{C1000} (parameter of complexity and deformation). These 3 parameters provide diverse information about the data.

Second, it is possible to objectively describe a character of metal structure after corrosion attack. We are able to draw the conclusions:

Parameter of amplitude, Maximum Roughness Pt (Fig. 2), shows deepness of corrosion attack of metal surface by glass melt. The average dividing line deepness of alloy Fe-14Al-6Cr grows slowly up to 168 hours because iron aluminide dissolved slowly and uniformly in the molten glass than EN X8CrNi25-21 [16, 17]. The average dividing line deepness of austenitic steel grows from raw state during attack to 48 hours (Fig. 7). After 48 hours, it is apparent that corrosion protrusions penetrate less deeply into the surface of steel. It does not mean increase of corrosion resistance, but probably a progress of corrosion attack is more uniform in this time period. This should be analysed with using other methods e.g. the measurement of weight loss, chemical analyses etc. The maximal deepness of corrosion attack is after 168 hours.

Tab. 3 Correlation coefficients of selected parameters

	Relative Length, L_R [-]	Compass Dimension, D_{C1000} [-]	Mean Spacing, Sm [μm]	Average Roughness, Pa [μm]	Maximum Roughness, Pt [μm]	Standard Deviation, Std [μm]
Standard Deviation, Std [μm]	0,9	0,83	0,5	0,99	0,98	1
Maximum Roughness, Pt [μm]	0,88	0,85	0,47	0,96	1	
Average Roughness, Pa [μm]	0,91	0,82	0,49	1		
Mean Spacing, Sm [μm]	0,33	0,3	1			
Compass Dimension, D_{C1000} [-]	0,92	1				
Relative Length, L_R [-]	1					

	Fe-14Al-6Cr	EN X8CrNi25-21
before test		
after 48 h		

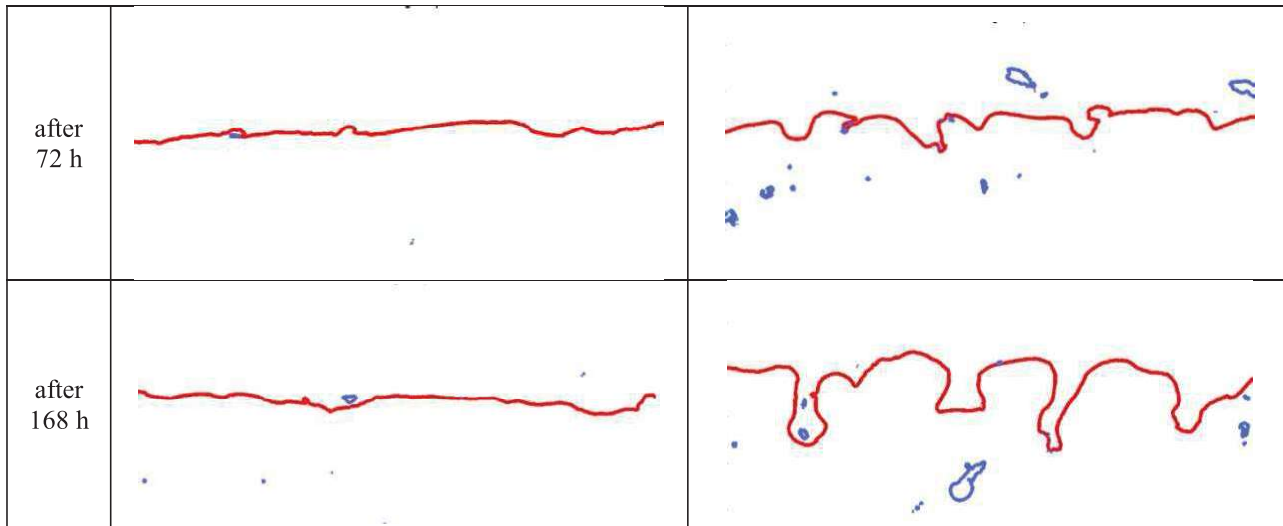


Fig. 7 Examples of dividing lines between alloy and glass

Parameter of frequency, Mean Spacing S_m (Fig. 4), shows surface profile spacing. The parameter describes corrugation frequency of the dividing line after corrosion attack, how many wavelets can be observed on the surface. For both alloys grows the parameter to 72 hours, where the maximum is. The frequency is connected to the corrosion mechanism.

Parameter of complexity and deformation, Compass Dimension D_{C1000} (Fig. 5), shows level of dividing line complexity. In case of alloy Fe-14Al-6Cr, the average complexity of surface expressed as Compass Dimension grows from 24 to 48 hours, and then slowly decreases. On the other hand, the average surface complexity of alloy EN X8CrNi25-21 increases significantly from raw state during attack up to 48 hours, then falls down, and grows to the maximum after 72 hours. After 96 hours, slight decrease of D_{C1000} was observed. The significant decrease in value of D_{C1000} after 48 hours is probably related to more uniform a progress of corrosion. For understanding the corrosion mechanism of steel, it is necessary to carry out further analysis.

It is obvious, that dividing lines of alloy Fe-14Al-6Cr after corrosion attack are smoother and lower complex. It seems that the corrosion resistance of Fe-14Al-6Cr is higher than steel EN X8CrNi25-21. Austenitic steel showed corrosion protrusions due to probably intergranular corrosion (preferential attack of some phases at grain boundaries). However, this statement should be supported by structural and phase analysis.

4 Conclusion

The article shows that developed methodology can be used for quantification of surface changes of alloys or metals during corrosion attack by molten glass. The suitable parameters for evaluation of these types of data were found: Maximum Roughness, P_t (parameter of amplitude), Mean Spacing, S_m (parameter of frequency), Compass Dimension, D_{C1000} (parameter of complexity and deformation). The developed methodology was applied to iron aluminide (Fe-14Al-6Cr) and austenitic steel (EN X8CrNi25-21), which were tested in molten soda-lime glass at 1200°C. The results confirmed that it is possible to compare easily corrosion resistance of materials with different chemical composition. These findings extend the possibilities (besides other methods e.g. measurement of weight loss) of quantification of corrosion resistance of metallic materials against molten glass.

Acknowledgement

This research was supported by The Czech Science Foundation GACR (P108/12/1452).

References

- [1] MANDELBROT, B.B. (1982). *The fractal geometry of nature*, second ed., Freeman WH and Co., New York.
- [2] PEITGEN, H. O., JUERGENS, H., SAUPE, D. (1992). *Chaos and Fractals: New Frontiers of Science*. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg
- [3] EVERTSZ, C. J. G., PEITGEN, H. O., VOSS, R. F. (1996). *Fractal Geometry and Analysis*. World Scientific Publishing Co.Pte. Ltd. Singapore
- [4] HILBORN, R. C. (2003). *Chaos and Nonlinear Dynamics*. New York: Oxford.
- [5] GULICK, D. (1992). *Encounters with Chaos*. McGraw-Hill, Inc.

- [6] LEVY, V.J., LUTTON, E., TRICOT, C. (1997). *Fractals in Engineering*. Springer-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg
- [7] CONCI, A., PROENCA, C.B. (1998). A fractal image analysis system for fabric inspection based on a box-counting method. In: *Computer Networks and Isdn Systems*, Vol. 30, pp. 1887-1895.
- [8] YU, L., QI, D.W. (2011). Applying multifractal spectrum combined with fractal discrete Brownian motion model to wood defects recognition. In: *Wood Science and Technology*, Vol. 45, pp. 511-519.
- [9] MUGUTHU, J.N., GAO, D. (2013). Profile Fractal Dimension and Dimensional Accuracy Analysis in Machining Metal Matrix Composites (MMCs). In: *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, pp. 1102-1109.
- [10] ZHENG, C.X., SUN, D.W., AND ZHENG, L.Y. (2006). Recent applications of image texture for evaluation of food qualities - a review. In: *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 17, pp. 113-128.
- [11] HOTAR, V. (2013). Fractal geometry for industrial data evaluation. In: *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 66, pp. 113-121.
- [12] HOTAR, V., NOVOTNY, F., AND REINISCHOVA, H. (2011). Objective evaluation of the corrugation test for sheet glass surfaces. In: *Glass Technology-European Journal of Glass Science and Technology Part A*, Vol. 52, pp. 197-202.
- [13] HOTAŘ, V., NOVOTNÝ, F. (2005). Surface Profile Evaluation by Fractal Dimension and Statistic Tools. In *proceedings: 11th International Conference on Fracture. CCI Centro Congressi Internazionale s.r.l.*, pp. 588, Turin.
- [14] HOTAR, V., NOVOTNY, F. (2004). Evaluation of surface defects by fractal geometry and statistical analysis. In: *Glass Science and Technology*, Vol. 77, pp. 230-237.
- [15] HOTAŘ, V., SALAČ, P. (2014) *Surface Evaluation by Estimation of Fractal Dimension and Statistical Tools*. The Scientific World Journal, vol. 2014, Article ID 435935, 10 pages.
- [16] HOTAR, A., KRATOCHVIL, P., AND HOTAR, V. (2009). The corrosion resistance of Fe₃Al-based iron aluminides in molten glasses. In *Kovove Materialy-Metallic Materials*, Vol. 47, pp. 247-252.
- [17] HOTAR, A., HOTAR, V., AND NOVOTNY, F. (2014). Corrosion behaviour of Fe-40Al-Zr (at.%) alloy in molten soda-lime glass. In: *Kovove Materialy-Metallic Materials*, Vol. 52, pp. 149-155.
- [18] DEEVI, S.C., SIKKA, V.K. (1996). Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. In *Intermetallics*, Vol. 4, pp. 357-375
- [19] ŠVEC, M., VODIČKOVÁ, V. (2014). The Effect of Niobium Addition and Heat Treatment on the Phase Structure of Fe₃Al – Type Intermetallic Alloys. In *Manufacturing Technology*, Vol. 14, pp.456 – 461.
- [20] ISO 4287 (1997). *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters*. International Organization for Standardization, Geneva.

Surface Roughness Optimization in Milling Aluminium Alloy by Using the Taguchi's Design of Experiment

Julia Hricova¹, Natasa Naprstkova²

¹Faculty of Environmental and Manufacturing Technology, Technical University in Zvolen, Studentska 26, 960 53 Zvolen, Slovak Republic, E-mail: julia.hricova@tuzvo.sk

²Faculty of Production Technology and Management, J. E. Purkyne University in Usti nad Labem. Pasteurova 3334/7, 400 01 Usti nad Labem. Czech Republic. E-mail: naprstkova@fvfm.ujep.cz

A unique combination of properties makes aluminium one of the most versatile engineering and construction materials. The aluminium alloys can be machined easily and economically if suitable practice and proper tools are used. A statistical design of experiments was performed to investigate the effect of selected cutting parameters and a cutting fluid on the surface roughness of AlMgSi1 aluminium alloy (EN AW 6082) machined by end milling. For the experimental procedure, three cemented carbide end milling cutters of diameter 12 mm with 3 cutting edges were used. The input parameters taken into consideration were helix angle, cutting speed, and using a cutting



Fractal dimension used for evaluation of oxidation behaviour of Fe-Al-Cr-Zr-C alloys

Vlastimil Hotar^{a,*}, Adam Hotar^b

^a Department of Glass Producing Machines and Robotics, Technical University of Liberec, Studentská 2, 461 17 Liberec, Czech Republic

^b Department of Material Science, Technical University of Liberec, Studentská 2, 461 17 Liberec, Czech Republic

ARTICLE INFO

Keywords:

A. Intermetallics (based on Fe₃Al)

B. Fractal geometry

C. Oxidation

ABSTRACT

The article describes the possibility of using a methodology for the quantification of oxidised surfaces. The methodology is based on determining the parameters on a dividing line between alloy and air which has been generated from images of a cross-section sample. The parameters are obtained from the methodology using fractal geometry, surface roughness characterisation and statistic tools. The methodology is presented on oxidised iron aluminides (Fe-29.7Al-3.8Cr-0.3Zr-0.2C and Fe-26.4Al-2.8Cr-0.2Zr-0.6C) at high temperatures (900–1200 °C). The results show that methodology can be used for easy quantification of alloy oxidation attacks and for easy comparison of alloy oxidation resistance.

1. Introduction

Iron aluminides have been studied as potential alloys for structural applications at high temperatures. The reason for choosing them was that binary Fe-Al alloys have very good high-temperature oxidation and corrosion resistance [1,2]. Binary Fe-Al alloys are frequently alloyed to improve mechanical properties, especially at high temperatures. However, alloying could have a detrimental effect on corrosion resistance, for example zirconium content above 0.1 at.% causes the formation of oxide protrusions due to preferential attack of Zr-rich precipitates [3–5]. In the case of alloying by tantalum, the spallation of oxide film was observed, possibly because Laves phase Fe₂Ta formed underneath the oxide scales at temperatures above 900 °C [6]. Therefore, the high-temperature oxidation and corrosion resistance of alloys should be tested and analysed. Measurements of mass changes, analysis of phases in and under the oxide layer, changes of chemical compositions depending on distance from the surface are usually applied to understand the corrosion mechanism and behaviour. Besides these “standard” methods, fractal dimension is increasingly being applied to describe the corrosion behaviour.

1.1. Fractal dimension

Fractal dimension is part of the wider theory of fractal geometry. Fractal geometry is closely connected to chaos theory. Furthermore, the obtained structures were produced by real dynamic systems, and the

obtained data was influenced by these systems [7–9]. The data can also be tested for chaotic properties and also simulated. A chaotic system can be identified by standard tools like Lyapunov coefficient, Hurst coefficient and also by fractal dimension.

The fractal dimension was defined by Benoit Mandelbrot [10], though scientists found some geometric problems with specific objects (e.g. the measurement of coastlines using different lengths of rulers by Richardson). A potentially powerful property of fractal dimension is the ability to describe complexity using a single number that defines and quantifies structures [7,11]. The number is mostly a non-integer value and the fractal dimension is higher than the topological dimension. For example, the Koch curve (one of the most famous mathematical deterministic fractals) has the topological dimension $D_T = 1$, but the fractal dimension $D_F = 1.2619$. In contrast, a smooth curve, as a line, has the topological dimension $D_T = 1$ and the fractal dimension $D_F = 1$. The fractal dimension can be computed or estimated for a set of points, curves, surfaces, topological 3D objects, etc. If the fractal dimension is higher than the topological dimension, we name the objects fractals. The fractal dimension of mathematical deterministic fractals can be calculated, while the fractal dimension of natural objects, series and sets can only be estimated using an appropriate method.

Even though applications of fractal dimension in industrial practice are quite rare and experimental [12], it is possible to find a promising test and applications [13–19]. However, the fractal dimension does not substitute other tools like statistics; the dimension provides additional information about the data. Previous research [15,20–24] shows that

* Corresponding author at: Technical University of Liberec, Faculty of Engineering, Department of Glass Producing Machines and Robotics, Studentská 2, CZ 46117 Liberec, Czech Republic.

E-mail addresses: vlastimil.hotar@tul.cz (V. Hotar), adam.hotar@tul.cz (A. Hotar).

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.01.017>

Received 15 June 2017; Received in revised form 5 January 2018; Accepted 18 January 2018
0010-938X/ © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

fractal dimension in conjunction with statistics can be used as a useful and powerful tool for an explicit, objective and automatic description of production process data (laboratory, off-line and potentially on-line).

A significant field of application for fractal dimension has been describing the morphology, roughness and texture of material surfaces. Fractal dimension was often used for evaluation or quantification of metallic corrosion previously by many authors. Most of the authors used the estimated fractal dimension for analyses of whole images of a corroded surface using the box counting method [25–31]. Analysis of a dividing line (boundary curve) can also be found [32], but authors also use the box counting method. The fractal dimension of a surface can also be estimated by the triangulation method [18] or using multifractal methods [33]. However, the box counting method has several problems, especially associated with repeatable image acquisition and processing. This method works with binary (black & white) images of fractals, however images of corroded structures are mostly displayed as grey-level or even colourized images. To ensure repeatability, transformation to a binary image must be made in the same way (using the same level of grey for thresholding). The transformation also requires the same image format (the same grey-level, colour mask, compression ...). These requirements can be fulfilled with strict adherence, which guarantees repeatability. Complications occur in determining the illumination and hardware conditions. The key issue is surface lighting to capture images: light position (especially angle), irradiance, wavelength of light, and the character of lighting (diffuse or directional). Furthermore, a camera has many parameters to be set, such as shutter speed (exposure time), aperture settings (f-number or f-stop), gain (ISO sensitivity) etc. Problems may occur in the comparison of surfaces with different reflection properties. All these problems make using the box counting method difficult to use for the comparison of several types of surfaces. Ensuring the same conditions independently on a device is impossible.

Pursuant to the given problems, we carry out research on the application of other methods for fractal dimension estimation. The compass method for a dividing line (boundary curve) seems to be suitable for estimating the fractal dimension [15–17,20–22]. Information on roughness or corrosion attack must be reduced to a 1D representation, into the dividing line between alloy and air, or glass and other environments. Cross-section samples must be prepared for image obtaining that make the analysis more time consuming. However, conditions for obtaining the dividing line are not as strict as for the Box-Counting method. It is important to have a sufficient visible contrast between the alloy and the surroundings, a well-focused image, and to use the same scale for comparing a given set of samples. Furthermore, cross-section sample images are used commonly while investigating alloy corrosion behaviour.

In general, cross-sections of corroded samples have different levels of surfaces, Fig. 1. The surfaces are represented by a dividing line between the alloy and oxide layer. The dividing line can be smooth, corrugated or complex on a different level and the line can be compared or described by words or using suitable photos. However, objective quantification can give additional information or can substitute some parameter of the corrosion obtained from other methods.

The selected parameters of fractal dimension and statistical tools were used in [16,17] for the quantification of corrosion resistance against molten glass. Iron aluminides with different chemical compositions and austenitic steel were tested in lead molten glass and in molten soda-lime glass. The results revealed the detrimental effect of zirconium on the corrosion resistance of iron aluminides and the comparable or better corrosion resistance of Fe-25Al-5Cr compared to austenitic steel. Nevertheless, these parameters were evaluated only for comparison between the state of samples surface before and after the corrosion test. The paper [15] described the methodology application for corrosion attack of Fe-14Al-6Cr in molten soda-lime glass depending on time. The basics of the methodology were described earlier in [20,21].

The purpose of this paper is to present a developed objective methodology for quantification of the surface roughness of oxidised alloys for easy comparison of oxidation resistance of alloys, which have different chemical compositions. The methodology, which takes advantage of fractal geometry, was developed and applied on alloys based on Fe-Al-Cr-C-Zr. The high-temperature oxidation behaviour of these alloys were investigated using “standard” methods such as light optical microscopy (LOM), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and energy-dispersive X-ray spectrometry (EDS) previously in [3].

2. Experiment

2.1. Samples and oxidation test

Two Fe-Al-Cr-Zr-C alloys were melted in a vacuum furnace and ingots were produced by investment casting [3]. The composition of the alloys (in at.%) is given in Table 1. The ingots with dimensions $30 \times 40 \times 350 \text{ mm}^3$ were rolled at 1200°C to sheets with a final thickness of 13 mm. For oxidation tests rolled samples with dimensions $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ were cut by electrical discharge machining (EDM) and then the surfaces of the samples were finely ground to 1200 grit (initial state).

The oxidation tests were carried out using a Setaram SETSYS 16/18 thermobalance with continuous recording of the mass gains and a heating rate of $9^\circ\text{C}/\text{min}$. Samples of both alloys were oxidised in synthetic air (20.5% O_2 , 79.5 N_2) at a flow rate of $1.54 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ at temperatures ranging from 900 to 1200°C .

2.2. Methodology

After the oxidation test, samples were carefully cut and encapsulated in the conductive resin. Then the samples were ground and polished with diamond suspensions, the last step was polishing with $0.05 \mu\text{m}$ of colloidal silica. The cross section of the surface was investigated using light optical microscopy, see Figs. 1 and 2 and Fig. 2a. The images were evaluated and described by image analysis using a software tool developed in Matlab (release R2009a and R2013b). The objective evaluation of a dividing line must solve three key steps:

- repeatable and reliable determination of the dividing line (pre-processing, Fig. 2b),
- evaluation of the dividing line by appropriate parameters (processing, Fig. 2c–f) and
- selection of useful information from the results (post-processing, Fig. 2g).

2.3. Repeatable and reliable determination of dividing line

The same conditions of image acquisition for the determination of the dividing line were provided. The images used were sharp and had a sufficient contrast between the alloy and oxides (scales) or products of corrosion. The images were in the same magnification and the same grey-level, also captured under the same light conditions, using the same exposure setting (shutter speeds, lens aperture, gain) and using the same equipment for image capturing. The borderline (dividing line) between the alloy and oxide layer must be continual from left to right in captured images, without a break, because the aim was to simplify and to objectify the image processing and also to strictly use only the surface for image analysis.

Matlab was used for determining the dividing lines low-level contour plot computation *contour* in software. A toolbox for finding and verifying dividing lines was developed. The toolbox is able to automatically determine the dividing line.

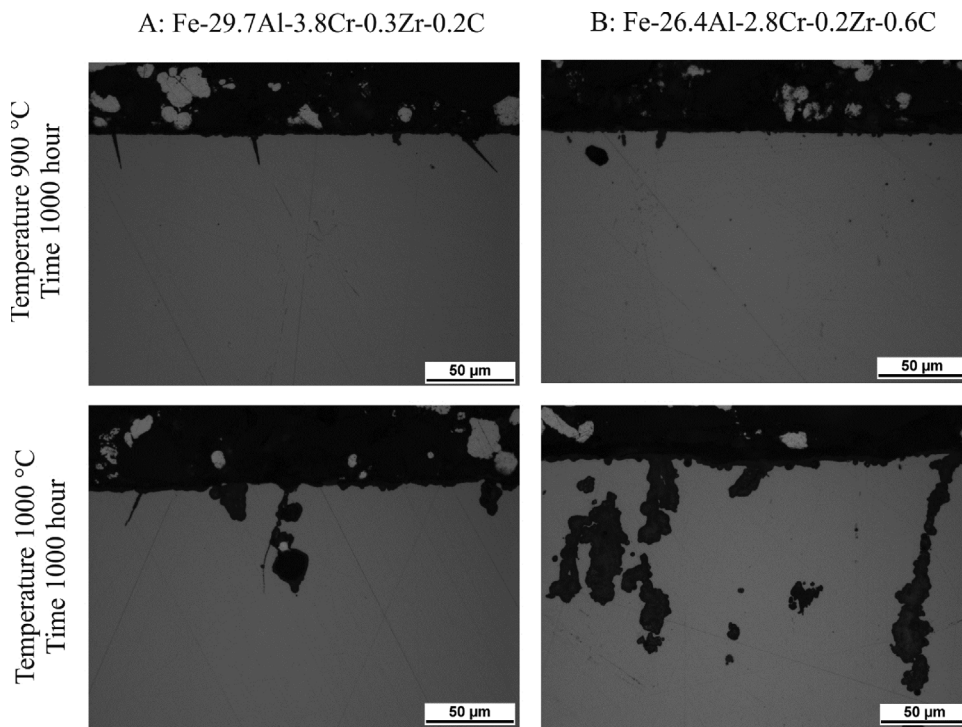


Fig. 1. Grey scale image from cross-sections of corroded samples (light optical microscopy), corrosion test on high temperature for materials: Fe-29.7Al-3.8Cr-0.3Zr-0.2C and Fe-26.4Al-2.8Cr-0.2Zr-0.6C.

Table 1
Chemical composition of alloys in at. %.

Alloy	Al	Zr	Cr	C	Fe
A	29.7	0.3	3.8	0.2	Bal.
B	26.4	0.2	2.8	0.6	Bal.

2.3.1. Evaluation of dividing line by appropriate parameters

Many types of parameters can be used for the quantification of metal roughness. The parameters can be divided into three groups:

- *parameters of amplitude*, useful for depth characterization (*Std* – Standard Deviation, *Pa* – Average Roughness, *Pt* – Maximum Roughness, etc.);
- *parameters of frequency*, used to describe surface profile spacing parameters and for corrugation frequency characterization (e.g. *Sm* – Mean Spacing);
- *parameters of complexity and deformation*, estimation of fractal dimension by Compass Dimension (D_c), by Relative Length (L_R) of the profile.

The mentioned parameters of amplitude and frequency are commonly used in industrial practice. These parameters are based on statistics. Typically, standard deviation *Std* is a widely used statistical tool. Average Roughness (*Pa*), Maximum Roughness (*Pt*), and Mean Spacing (*Sm*) are commonly used surface profile parameters defined by standard ISO 4287-1997 [34]. In this field of research, a filtered profile is not used. For this reason, the Average Roughness of profile is called *Pa* (commonly labelled *Ra* after filtered profile) and Maximum Roughness is denoted as *Pt* (commonly labelled *Rt* after filtered profile).

The parameters of complexity and deformation were selected based on previous experience. The estimated Compass Dimension expresses the degree of profile complexity by means of a single number. The compass method [7,10,11] is based on measuring the profile (curve) using different ruler sizes (Fig. 1d) according to the equation:

$$L_i(r_i) = N_i(r_i) \cdot r_i \quad (1)$$

Where L_i is the length in i -step of the measurement, r_i is the ruler size

and N_i is the number of steps needed for the measurement. If the profile is fractal, and hence the estimated fractal dimension is larger than the topological dimension, then the length measured increases as the ruler size is reduced. The logarithmic dependence between $\log_2 N(r_i)$ and $\log_2 r_i$ is called the Richardson-Mandelbrot plot (Fig. 2e). The Compass Dimension is then determined from the slope s of the regression line:

$$D_C = 1 - s = 1 - \frac{\Delta \log_2 L(r)}{\Delta \log_2 r} \quad (2)$$

For better comparison of results, the dimension is multiplied by 1000 (D_{C1000}). The fractal dimension can also be estimated using other methods [11].

The rate of profile deformation can be evaluated from its Relative Length L_R . This fast and reliable method measures the ratio of the profile length l_{PIXEL} using the smallest ruler (1 pixel) r_{PIXEL} and the length of the projection l (Fig. 2f)

$$L_R = \frac{l_{PIXEL}}{l} \quad (3)$$

The evaluation of parameters must be carried out at multiple locations. We use 10 locations for each sample (each alloy and time interval), which is sufficient for statistical evaluation.

2.3.2. Selection of useful information from results

The developed methodology contains 22 parameters. However, for complete and reliable analysis significantly fewer parameters can be used, which simplifies analysis and reduces processing time. The reason is that some parameters linearly correlate with others (they provide similar information about the data). Using parameters with the same information should be reduced. For this reason, Pearson's correlation coefficients were computed to evaluate the parameters objectively.

If a linear correlation is assumed, we can specify suitable parameters for the evaluation. A suitable strategy is to get one parameter from each group: parameter of amplitude, parameter of frequency, and parameter of complexity and deformation. We choose the lowest correlation parameter in comparison with another group. These 3 parameters provide diverse information about the data, and thus we would be able to objectively describe the character of oxidation attack of alloys.

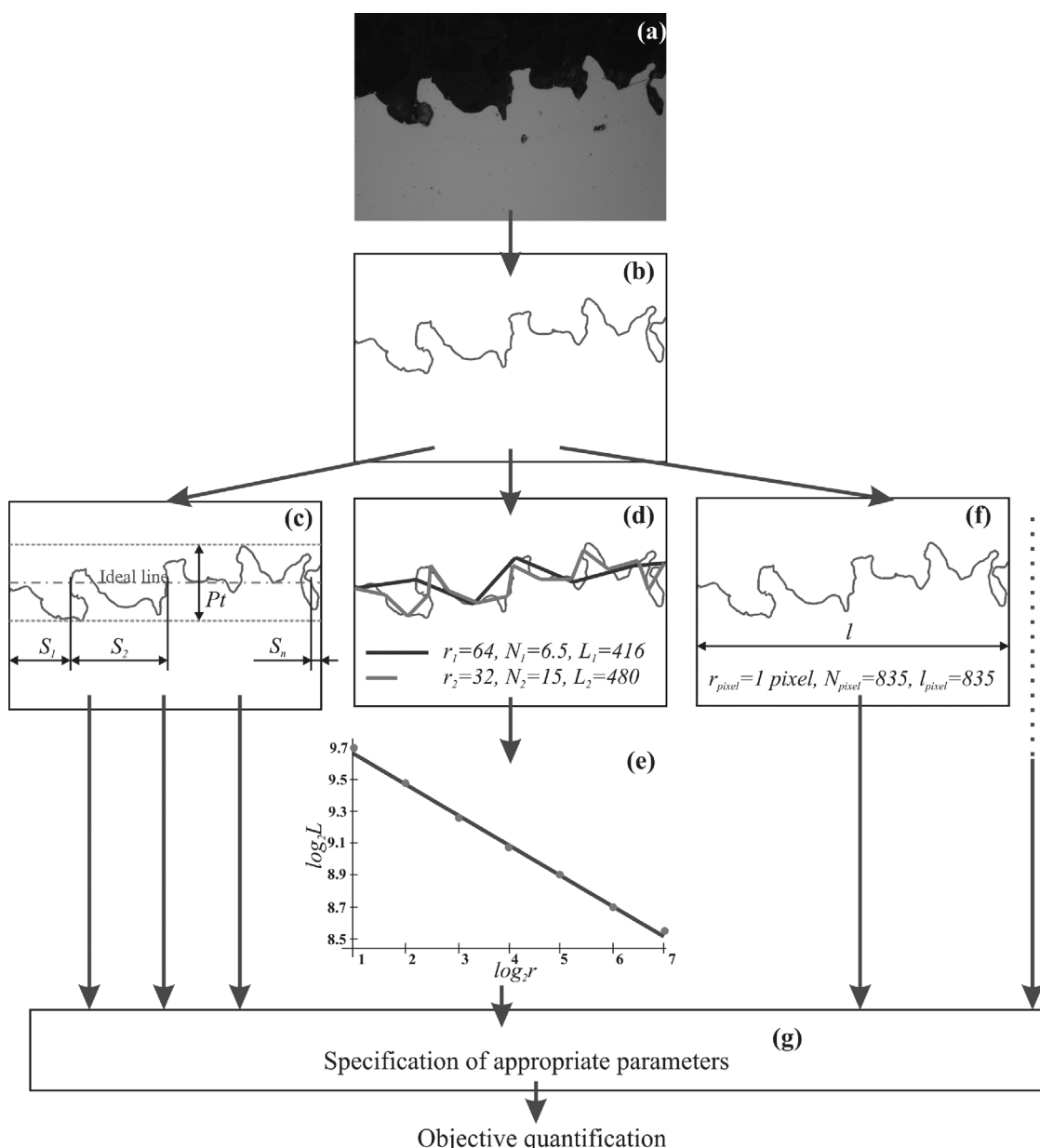


Fig. 2. Image analysis: a – grey scale image from light optical microscopy, b – determined dividing line between the alloy and surroundings – oxides (scales) or products of corrosion (boundary curve), c – parameter of amplitude (P_t – maximum roughness) and parameter of frequency (S_m – mean spacing), d – computing of compass dimension, e – compass dimension D_C computed from slope, f – computing of relative length L_R , g – specification of parameters for objective quantification.

3. Result and discussion

The structures of tested alloys were described in [35] in detail. Alloy A is characterised by an Fe_3Al matrix with elongated particles of the Laves phase ($\text{Fe,Al}_2\text{Zr}$), which occur mostly along the grain boundaries (Fig. 3). On the other hand, alloy B contains ZrC particles instead of the Laves phase. ZrC precipitates were observed not only at the grain boundaries but also inside the grains (Fig. 3). In the case of both alloys, the grain size is about $500 \mu\text{m}$.

Alloys A and B were oxidised for up to 1000 h in synthetic air, in a temperature range from 900 to 1200°C . Corrosion behaviour of alloys A and B, analysis of scales and change of chemical composition near the surface were carefully investigated in [3]. The following text reveals the possibilities of fractal analysis for determination and quantification of oxidation attack of alloys A and B. First, the effect of chemical composition on oxidation resistance (the comparison of oxidation resistance of alloys A and B) was observed at 900 and 1000°C . The next

investigation shows the development of the corrosion attack of alloy B depending on temperature (from 900 to 1200°C).

3.1. Comparison of oxidation attack of different alloys

The surface roughness parameters of previously specified alloys A and B were measured before and after exposure to air at 900 and 1000°C . Fig. 4 shows an example of dividing lines from greyscale images in Fig. 1. The roughness of samples before the oxidation test was caused by grinding. During the oxidation of samples, the effect of grinding was suppressed and the effect of high-temperature oxidation became evident on the surface roughness especially at 1000°C (Fig. 4).

Pearson's correlation coefficients were calculated for evaluation of the obtained parameters using the methodology described, Table 2. Some parameters linearly correlate with others and it can be assumed that they provide similar information on the data. We can specify suitable parameters for the evaluation of these types of data such as:

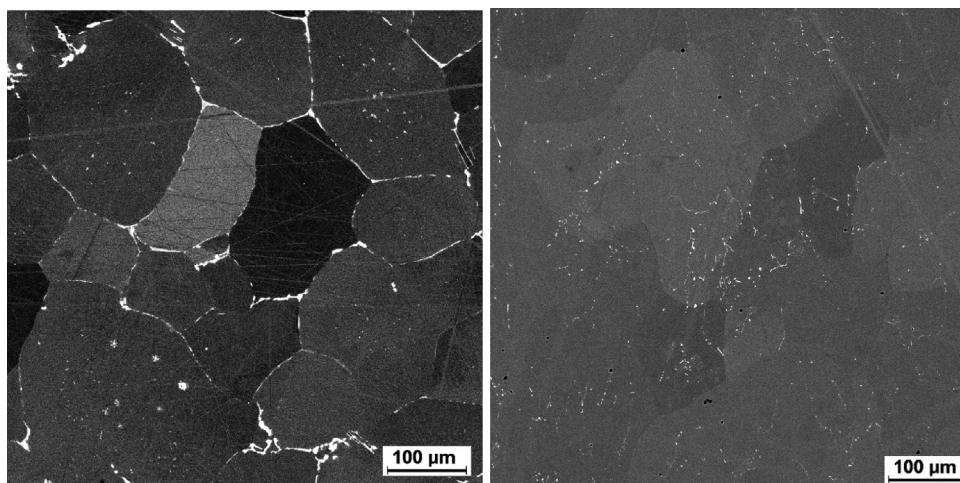


Fig. 3. Structure of alloy A (on the left) and alloy B (on the right).

Standard deviation, Std (parameter of amplitude), Mean Spacing, Sm (parameter of frequency), Compass Dimension, $D_{C\ 1000}$ (parameter of complexity and deformation). These 3 parameters provide diverse information about surface roughness.

The graphs in Fig. 5–7 show the values of the relevant parameters of alloys A and B oxidised at 900 °C and 1000 °C. Average values were calculated from 10 dividing lines for each sample and they are represented as point in the graphs. Calculated standard deviations are represented as a vertical line in the graphs.

3.1.1. Corrosion at 900 °C

The oxidation processes of both alloys at 900 °C are slightly different [3]. Thin and adherent oxide scales were observed on the surfaces of both alloys but alloy A has higher weight gain than alloy B (Fig. 8). This difference between alloys A and B revealed inspection of cross-section using roughness parameters (Figs. 4–7). In the case of alloy A, higher values of Std and $D_{C\ 1000}$ are mainly caused by the presence of cracks, which is observed on surface [3] and on cross-section (Fig. 4). The cracks are oxidised, therefore the formation of cracks relates to the

heating of the sample. Besides the cracks, oxide protrusions were also observed. On the other hand, the distance between the cracks (Sm) of alloy A is longer as the cracks are deeper and fewer than the small oxide protrusions formed on alloy B. The parameters of amplitude (Std) and of complexity ($D_{C\ 1000}$) for alloy A are slightly higher than the parameters of alloy B and these results are well in agreement with values of mass gain, see Fig. 8.

3.1.2. Corrosion at 1000 °C

After oxidation at 1000 °C, inspection of the cross-section shows ingress of the oxidation into the samples of both alloys. Therefore, the evaluated parameters of both alloys grew significantly compared with oxidation at 900 °C (Figs. 5–7). The values of roughness parameters reveal differences of corrosion resistance between alloys A and B against the high-temperature oxidation. Alloy A has lower values of Std (Fig. 5) as its oxidation protrusions are smaller than the oxide protrusions into alloy B. In addition, the lower value of the parameter Sm shows that frequency of protrusion is lower than in the case of alloy B, see Fig. 6. The surface in initial state (0°) was ground, therefore values

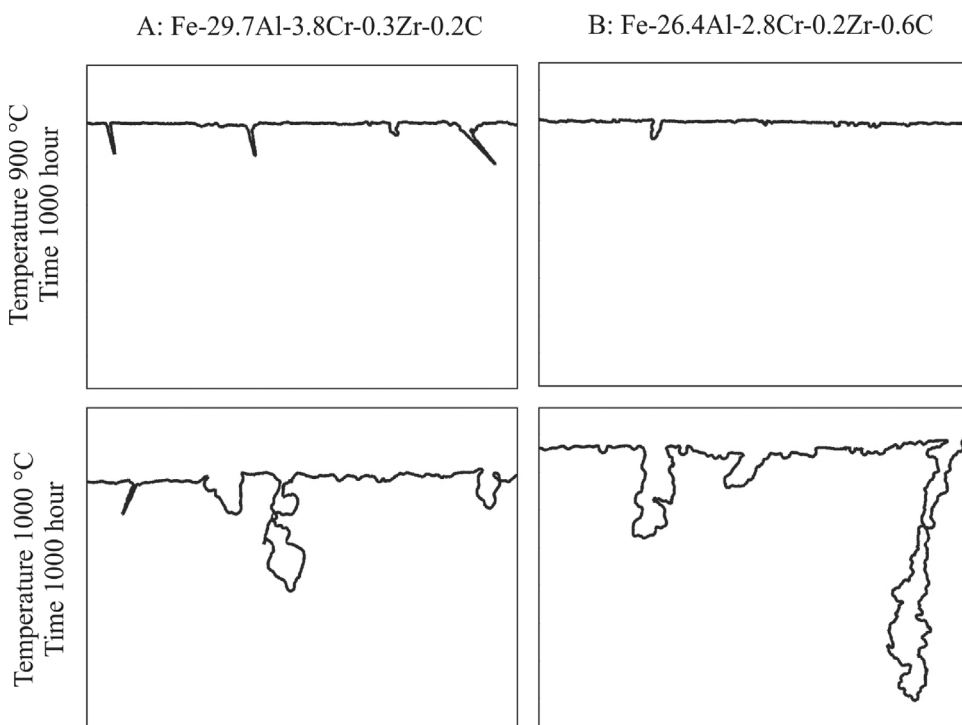
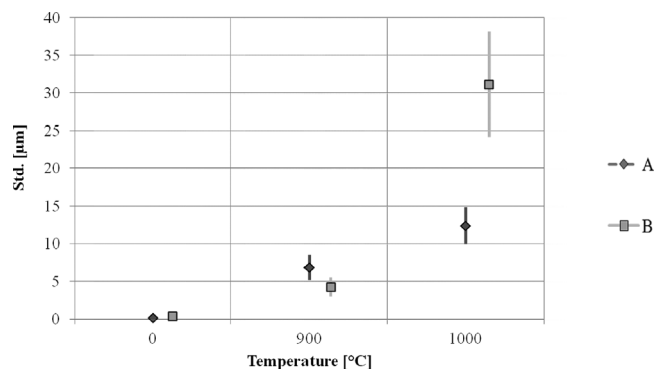
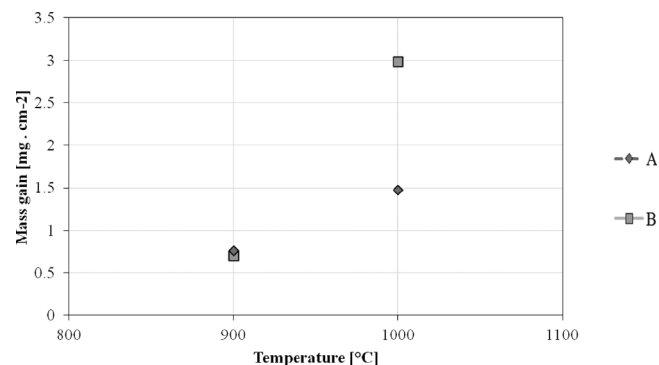
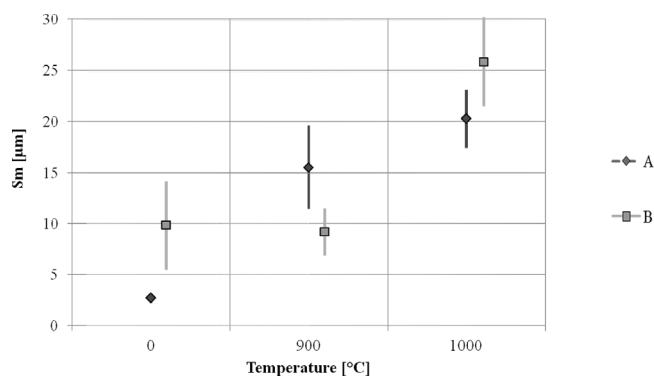
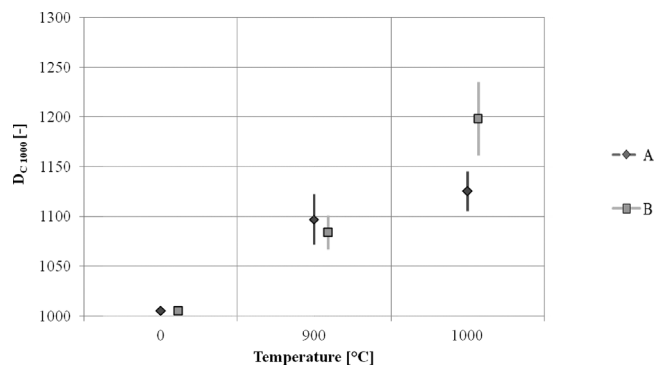


Fig. 4. Evaluated dividing lines between the alloy and oxide layer (from grey scale images in Fig. 1).

Table 2

Correlation coefficients of selected parameters, comparison of oxidation attack of different alloys.

	Relative Length, L_R [—]	Compass Dimension, D_{C1000} [—]	Mean Spacing, S_m [μm]	Average Roughness, P_a [μm]	Maximum Roughness, P_t [μm]	Standard Deviation, Std [μm]
Standard Deviation, Std [μm]	0.96	0.90	0.63	1.00	1.00	1.00
Maximum Roughness, P_t [μm]	0.96	0.91	0.65	0.99	1.00	
Average Roughness, P_a [μm]	0.95	0.89	0.62	1.00		
Mean Spacing, S_m [μm]	0.62	0.62	1.00			
Compass Dimension, D_{C1000} [—]	0.92	1.00				

**Fig. 5.** Standard deviation of profile, Std versus temperature of oxidation in air.**Fig. 8.** Mass gain after 1000 h of oxidation versus temperature [3].**Fig. 6.** Average Mean spacing, S_m versus temperature of oxidation in air.**Fig. 7.** Average Compass Dimension, D_{C1000} versus temperature of oxidation in air.

of S_m is not 0. D_{C1000} also confirms higher oxidation resistance of alloy A in air at high temperature. In the case of alloy B, oxides protrude more frequently and deeply from the surface into the sample (Fig. 4). Therefore, all the obtained parameters of alloy B are higher. The calculated results of the parameters are in correspondence with the

investigation in [3]. The difference of oxidation behaviour is caused by the different structure of alloys. The structure of alloy A consists of a Fe_3Al matrix with particles of the Laves phase, but alloy B is characterized by the presence of Fe_3Al matrix and ZrC precipitates instead of the Laves phase. Although both types of Zr-rich particles (Laves phase, ZrC) are preferentially oxidised, ZrC oxidised more readily than Laves phase. Moreover, for alloy B it is typical that oxidation is not limited to ZrC particles and propagates into the Fe_3Al matrix. The lower corrosion resistance of alloy B is also apparent from mass gain, see Fig. 8 (for a better view of the defects in the image, a magnification of 100 was used, for image analysis a magnification of just 500 was used). Fig. 8 reveals that the oxidation of the alloy B was significantly faster and the oxide thickness achieved double the value of that of alloy A after 1000 h.

3.2. Influence of temperature on oxidation of alloy

The influence of temperature on oxidation of alloy B was investigated. The roughness parameters of the oxidised surface were measured before and after exposure to air at different temperatures (at 900, 1000, 1100 and 1200 °C) for the same time periods (1000 h), Fig. 9. First, suitable parameters were specified using Pearson's correlation coefficients for evaluation of such types of data as: Average Roughness, P_a (parameter of amplitude), Mean Spacing, S_m (parameter of frequency), Relative Length, L_R (parameter of complexity and deformation). The results of Pearson's correlation are summarised in Table 3. The selected parameters provide diverse information about the data and the development of these parameters is seen in Figs. 10–12. Average values (represented as point in graphs) and standard deviations (represented as a vertical line) were calculated from 10 dividing lines, as in the previous analysis. The oxidation at 900 °C caused only a very slight increase in parameters of amplitude and parameters of complexity and deformation. On the other hand, the parameter Average Mean spacing (S_m) decreased because oxidation protrusions are deeper, but they are fewer than in the case of surface grinding, see Fig. 11.

Inspection of the surface roughness of oxidised alloy B showed that

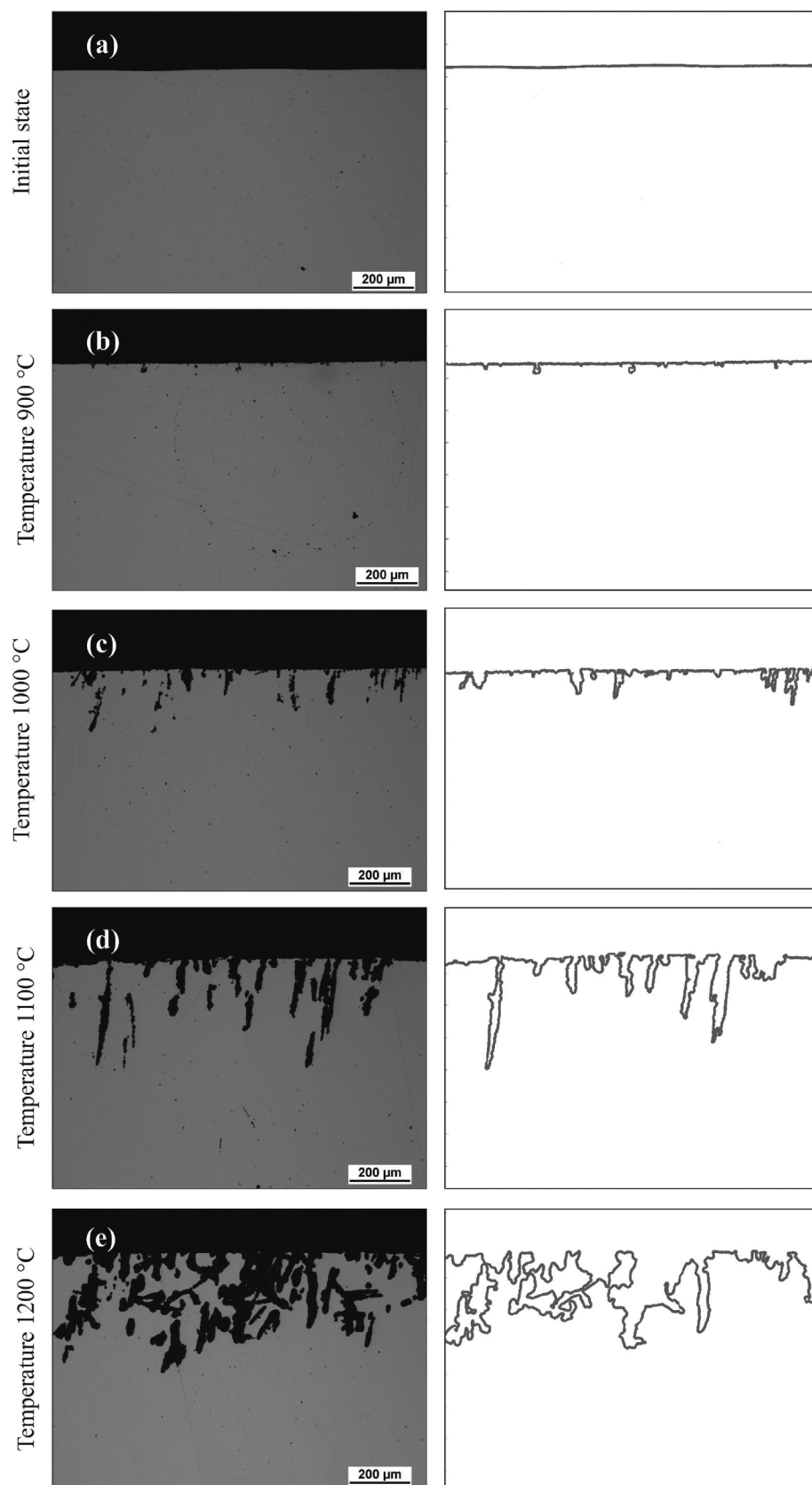


Fig. 9. Grey scale image of oxidised surface in cross-sections after different temperatures (light optical microscopy) – left column; evaluated dividing line between the alloy and oxide layer – right column.

after oxidation at 900 °C, oxides penetrated very little in places of Zr-rich precipitates (Fig. 9 – b). The cross section reveals few oxide protrusions and the protrusions are small. Therefore, parameters P_a and L_R increased slightly and parameter S_m decreased in comparison with

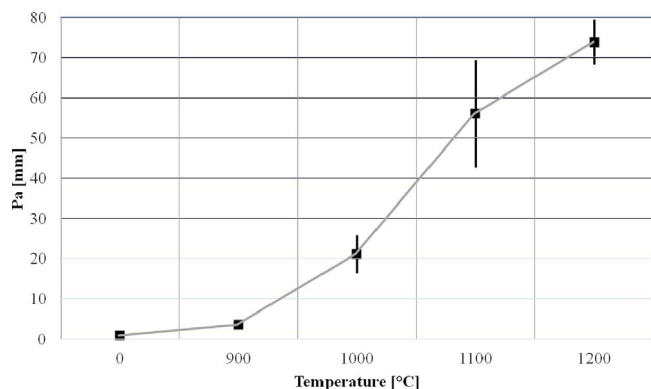
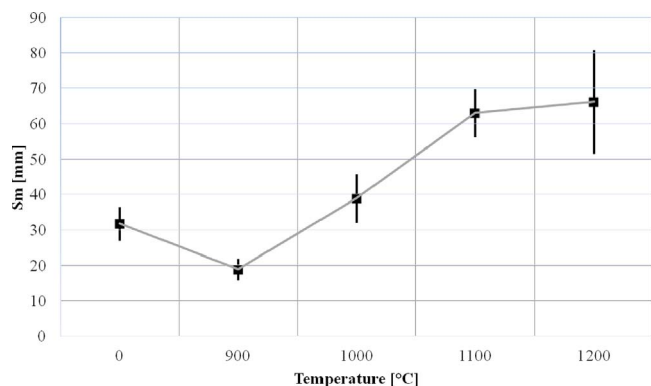
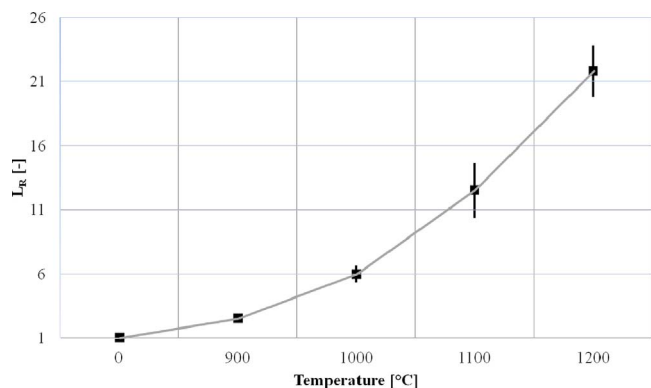
ground surface.

The oxidation at 1000 °C is characterized by the increase of all observed parameters. From Fig. 9 – c it is clear that oxidation penetrated into the surface of alloy B more frequently and more deeply than after

Table 3

Correlation coefficients of selected parameters, influence of temperature on oxidation of alloy B.

	Relative Length, L_R [—]	Compass Dimension, D_{C1000} [—]	Mean Spacing, S_m [μm]	Average Roughness, P_a [μm]	Maximum Roughness, P_t [μm]	Standard Deviation, Std [μm]
Standard Deviation, Std [μm]	0.93	0.94	0.75	1.00	0.98	1.00
Maximum Roughness, P_t [μm]	0.92	0.92	0.74	0.97	1.00	
Average Roughness, P_a [μm]	0.93	0.94	0.75	1.00		
Mean Spacing, S_m [μm]	0.59	0.71	1.00			
Compass Dimension, D_{C1000} [—]	0.94	1.00				
Relative Length, L_R [—]	1.00					

**Fig. 10.** Average Roughness of profile, P_a versus temperature of oxidation in air.**Fig. 11.** Average Mean spacing, S_m versus temperature of oxidation in air.**Fig. 12.** Average Relative Length, L_R versus temperature of oxidation in air.

oxidation at 900 °C. The oxide protrusions are slender and deep because Zr-rich particles are preferentially oxidised. Further deepening and an increase in the number of protrusions is caused by increasing the temperature to 1100 °C. Mean spacing S_m clearly shows the growth in the number of protrusions and the increase of the protrusion size is clearly defined by the Roughness of profile P_a and Relative length L_R . The shape of the protrusion (Fig. 9 – d) and early investigation [3] reveal that ZrC precipitates are still preferentially oxidised. On the other hand, for oxidation at 1200 °C it is typical that the oxidation is not limited to the ZrC particles but extends into the Fe-Al matrix. The oxidation does not progress only perpendicularly from the surface into the core but it is branched, see Fig. 9 – e. The branching of oxidation is well reflected by Relative length L_R . The value of the Relative length again significantly increased while the growth of parameters P_a and S_m slowed down after oxidation at 1200 °C. In addition, a relationship between the lengths of the curve can be called area size, and weight gain is also apparent from Figs. 12 and 13 and .

4. Conclusion

The oxidation attack of alloys based on iron aluminide (Fe-29.7Al-3.8Cr-0.3Zr-0.2C and Fe-26.4Al-2.8Cr-0.2Zr-0.6C) by high temperatures (900–1200 °C) was quantified by methodology using fractal geometry and statistic tools. For the definition of an oxidised surface, one parameter was applied from each specific group: parameter of amplitude, parameter of frequency, and parameter of complexity and deformation.

The results can be summarized as follows:

1. The results reveal that the methodology can be used for describing and comparing oxidation of the surface attack of alloys with different chemical compositions. The methodology is useful for definition of attack degree, and then it is easy to determine the corrosion resistance of alloys. In the case of the tested alloys, the values of surface parameters show that alloys Fe-29.7Al-3.8Cr-0.3Zr-0.2C and Fe-26.4Al-2.8Cr-0.2Zr-0.6C have similar corrosion resistance at 900 °C. On the other hand, Fe-29.7Al-3.8Cr-0.3Zr-0.2C has greater corrosion resistance than Fe-26.4Al-2.8Cr-0.2Zr-0.6C after oxidation by 1000 °C.
2. The temperature also has a significant influence on corrosion resistance besides the chemical composition. The growth of oxide protrusions during temperature increase has been well recorded by all parameters. In the temperature range 900–1100 °C, the parameter of amplitude, parameter of frequency, and parameter of complexity and deformation grew rapidly. Above 1100 °C, the oxide protrusions therefore branched by a parameter of amplitude, and the parameter of complexity and deformation only grew.
3. This and also previous research shows that the fractal dimension in conjunction with statistics can be used as a useful and powerful tool for an explicit, objective and automatic description of corrosive attacks.

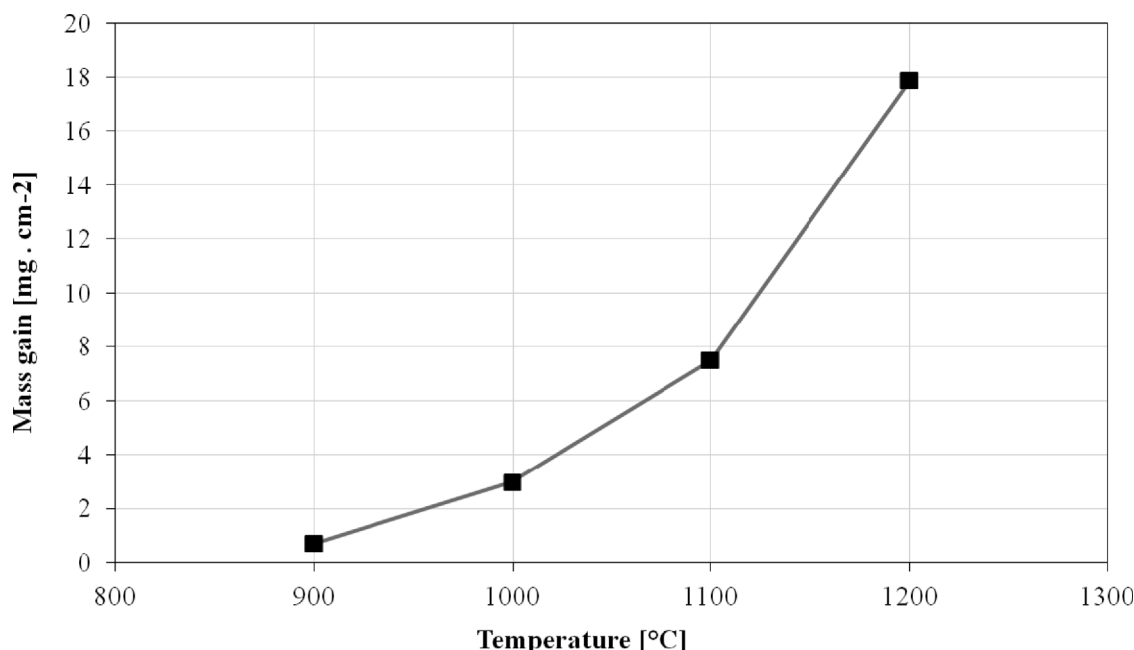


Fig. 13. Mass gain of alloy B after 1000 h of oxidation versus temperature [3].

4. The investigation in this manuscript confirms that the application of the tested methodology is not limited by the used material and environments (air, glass, etc.).

Acknowledgements

This article was written at the Technical University of Liberec as part of the project “Research and development in the field of glass-producing machines, industrial and service robotics” (SGS 21128/115) with the support of the Specific University Research Grant, as provided by the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic in the year 2017. The authors would like to thanks Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH for performing the corrosion tests.

References

- [1] C.G. McKamey, J.H. DeVan, P.F. Tortorelli, V.K.J. Sikka, A review of recent developments in Fe₃Al-based alloys, *J. Mater. Res.* 6 (1991) 1779–1805.
- [2] P.F. Tortorelli, K. Natesan, Critical factors affecting the high-temperature corrosion performance of iron aluminides, *Mater. Sci. Eng. A* 58 (1998) 115–125.
- [3] A. Hotař, M. Palm, P. Kratochvíl, V. Vodicková, S. Danis, High-temperature oxidation behaviour of Zr alloyed Fe₃Al-type iron aluminide, *Corros. Sci.* 63 (2012) 71–81.
- [4] D. Janda, et al., The effect of micro-alloying with Zr and Nb on the oxidation behavior of Fe₃Al and FeAl alloys, *Intermetallics* 41 (2013) 51–57.
- [5] A. Hotař, P. Kejzlar, M. Palm, J. Mlnářik, The effect of Zr on high-temperature oxidation behaviour of Fe₃Al-based alloys, *Corros. Sci.* 100 (2015) 147–157.
- [6] A. Hotař, M. Palm, Oxidation resistance of Fe-25Al-2Ta (at.%) in air, *Intermetallics* 18 (2010) 1390–1395.
- [7] H.O. Peitgen, H. Juergens, D. Saupe, *Chaos and Fractals New Frontiers of Science*, Springer-Verlag, New York, Berlin Heidelberg, 1992.
- [8] R.C. Hilborn, *Chaos and Nonlinear Dynamics*, (2003) (Oxford New York).
- [9] D. Gulick, *Encounters with Chaos*, McGraw-Hill, Inc, New York, 1992.
- [10] B.B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, second, Freeman WH and Co., New York, 1982.
- [11] C.J.G. Evertsz, H.O. Peitgen, R.F. Voss, *Fractal Geometry and Analysis*, World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore, 1996.
- [12] V.J. Levy, E. Lutton, C. Tricot, *Fractals in Engineering*, Springer-Verlag, New York, Berlin Heidelberg, 1997.
- [13] A. Conci, C.B. Proenca, A fractal image analysis system for fabric inspection based on a box-counting method, *Comput. Netw.* ISDN 30 (1998) 1887–1895.
- [14] J.N. Muguthu, D. Gao, Profile fractal dimension and dimensional accuracy analysis in machining metal matrix composites (MMCs), *Mater. Manuf. Process.* 28 (2013) 1102–1109.
- [15] A. Hotař, V. Hotař, Fractal geometry used for evaluation of corrosion resistance of Fe-14Al-6Cr wt.% against molten glass, *Manuf. Technol.* 15 (2015) 534–541.
- [16] A. Hotař, P. Kratochvíl, V. Hotař, The corrosion resistance of Fe₃Al-based iron aluminides in molten glasses, *Kovove Mater.* 47 (2009) 247–252.
- [17] A. Hotař, V. Hotař, F. Novotny, Corrosion behaviour of Fe-40Al-Zr (at.%) alloy in molten soda-lime glass, *Kovove Mater.* 52 (2014) 149–155.
- [18] E.J. Kim, S.J. Park, J.H. Heo, H. Ch. Shin, Corrosion resistance of stainless steels analyzed by fractal geometry, *J. Electrochem. Sci. Technol.* 1 (2) (2010) 112–116 <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=E1JTC5&py=2010&vnc=v1n2&sp=112> (Accessed 24 April 2017).
- [19] F. Novotny, M. Horak, M. Stary, Abrasive cylindrical brush behaviour in surface processing, *Int. J. Mach. Tool Manuf.* 118–119 (2017) 61–72.
- [20] V. Hotař, F. Novotny, Surface profile evaluation by fractal dimension and statistic tools, *Proc. 11th International Conference on Fracture, CCI Centro Congressi Internazionale s.r.l. Turin, 2005*, p. 588.
- [21] V. Hotař, F. Novotny, Evaluation of surface defects by fractal geometry and statistical analysis, *Glass Sci. Technol.* 77 (2004) 230–237.
- [22] V. Hotař, Fractal geometry for industrial data evaluation, *Comput. Math. Appl.* 66 (2013) 113–121.
- [23] V. Hotař, F. Novotny, H. Reinischova, Objective evaluation of the corrugation test for sheet glass surfaces, *Glass Technol.-Eur. J. Glass Sci. Technol. Part A* 52 (2011) 197–202.
- [24] V. Hotař, P. Salač, Surface evaluation by estimation of fractal dimension and statistical tools, *Sci. World J.* 24 (2014), <http://dx.doi.org/10.1155/2014/435935> Article ID 435935, 10 pages (Accessed 24 April 2017).
- [25] J.J. Park, S.I. Pyun, Pit formation and growth of alloy 600 in Cl⁻ ion-containing thiosulphate solution at temperatures 298–573 K using fractal geometry, *Corros. Sci.* 45 (2003) 995–1010.
- [26] F.F. Feliciano, F.R. Leta, F.B. Mainier, Texture digital analysis for corrosion monitoring, *Corros. Sci.* 93 (2015) 138–147.
- [27] Ch. Liang, W. Zhang, Fractal characteristic of pits distribution on 304 stainless steel corroded surface and its application in corrosion diagnosis, *J. Wuhan Univ. Technol.* 22 (2007) 389–393.
- [28] N. Lin, J. Guo, F. Xie, J. Zou, W. Tian, X. Yao, H. Zhang, B. Tang, Comparison of surface fractal dimensions of chromizing coating and P110 steel for corrosion resistance estimation, *Appl. Surf. Sci.* 311 (2014) 330–338.
- [29] R.M. Pidaparti, B.S. Aghazadeh, A. Whitfield, A.S. Rao, G.P. Mercier, Classification of corrosion defects in NiAl bronze through image analysis, *Corros. Sci.* 52 (2010) 3661–3666.
- [30] F. Jin, F.P. Chiang, Nondestructive evaluation of corrosion by fractal geometry, *Res. Nondestruct. Eval.* 7 (1996) 229–238.
- [31] J.M. Costa, F. Sagués, M. Vilarrasa, Fractal patterns from corrosion petting, *Corros. Sci.* 32 (1991) 665–668.
- [32] D.X. Yang, Y.G. Liu, M.H. Fang, Z.H. Huang, D.Y. Ye, Study on the slag corrosion resistance of unfired Al₂O₃-SiC/β-Sialon/Ti(C, N)-C refractories, *Ceram. Int.* 40 (2014) 1593–1598.
- [33] S. Xu, S. Ren, Y. Wang, Three-Dimensional surface parameters and multi-Fractal spectrum of corroded steel, *PLoS One* 24 (2015) Article ID e0131361, <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0131361> (Accessed 24 April 2017).
- [34] I.S.O. 4287, Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters, International Organization for Standardization, Geneva, 1997.
- [35] P. Kratochvíl, F. Dobeš, J. Pešička, P. Málek, J. Buršík, V. odičková V, P. Hanus, Microstructure and high temperature mechanical properties of Zr-alloyed Fe₃Al-type aluminides: the effect of carbon, *Mater. Sci. Eng. A* 48 (2012) 175–182.